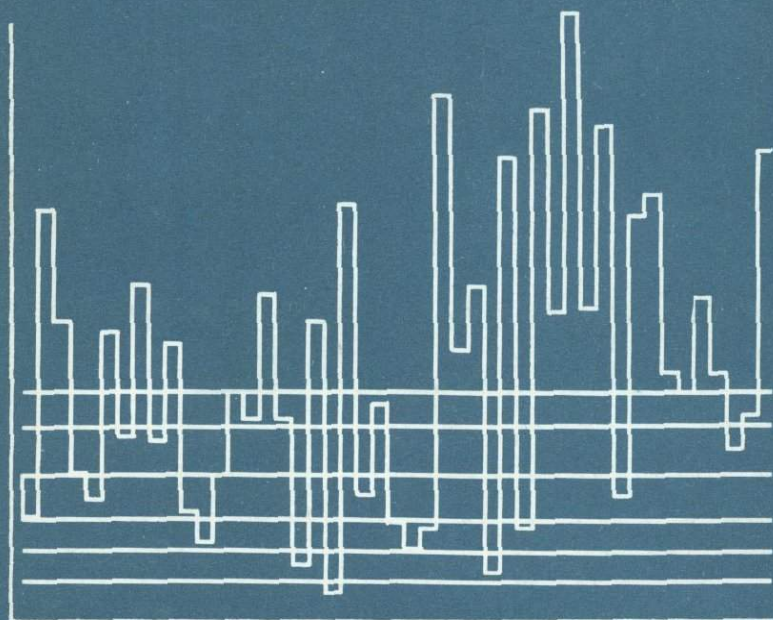


В.С.Ковалевский

**Многолетняя  
изменчивость  
ресурсов  
подземных вод**



Издательство · Наука ·

АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ

В.С.Ковалевский

**Многолетняя  
изменчивость  
ресурсов  
подземных вод**

3943



ИЗДАТЕЛЬСТВО "НАУКА"

Москва 1983



Ковалевский В.С. Многолетняя изменчивость ресурсов подземных вод. — М.: Наука, 1983.

В монографии исследованы многолетние тенденции в режиме подземных вод, синхронность и асинхронность режима, вероятностные закономерности чередований серии маловодных и многоводных лет и даны обоснования выбора оптимальных расчетных обеспеченностей восполнения ресурсов подземных вод, принимаемые при оценках эксплуатационных запасов подземных вод.

Рассмотрены также некоторые аспекты наращивания коротких рядов наблюдений и вопросы рационального использования подземных вод.

Ил. 74. Табл. 14. Библиогр. 95 назв.

Ответственный редактор

доктор геолого-минералогических наук

М.Р. НИКИТИН

## ВВЕДЕНИЕ

Подземные воды широко используются в народном хозяйстве страны для водоснабжения, орошения земель, обводнения пастбищ, как сырье для получения ряда ценных компонентов, для теплофикации, а также в лечебных целях. Особенно велико значение подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения, и эта их роль со временем все больше возрастает. Так, если 15–20 лет назад доля подземных вод в коммунальном водоснабжении [Гидрогеология СССР, 1977] составляла всего 10–15%, то в начале 70-х годов около 60% городов страны, в том числе такие крупнейшие, как Минск, Баку, Таллин, используют только подземные воды для питьевых нужд населения [Биндеман и др., 1977]. Около 20% городов имеют комбинированное водоснабжение за счет подземных и поверхностных вод, и лишь около 20% городов используют для водоснабжения только поверхностные воды. Однако и здесь предпринимаются меры для изыскания наиболее качественных подземных вод для хозяйственно-питьевых целей. Еще больше роль подземных вод в сельскохозяйственном водоснабжении.

Принимая во внимание существующую загрязненность поверхностных вод и потенциальную возможность их загрязнения и даже заражения в будущем, а также учитывая ряд преимуществ подземных вод (их чистоту, незначительную по сравнению с поверхностным стоком сезонную изменчивость режима и практически повсеместность их распространения), можно утверждать, что роль подземных вод в жизни населения страны в будущем еще больше возрастет.

Все это обязывает с особой тщательностью изучать ресурсы подземных вод, прогнозировать возможные изменения их количества и качества во времени под влиянием естественных и искусственных факторов, разрабатывать научные основы оптимального их использования и управления их режимом.

Современное использование подземных вод, по данным Н.И. Плотникова [1965], не превышает пока 7% от оцененных в целом по стране эксплуатационных ресурсов. Так, на крупное централизованное водоснабжение в СССР используется сейчас около 340 м<sup>3</sup>/с, на орошение около 200 м<sup>3</sup>/с и на мелкое сельскохозяйственное водоснабжение около 150 м<sup>3</sup>/с, т.е. в целом по стране используется около 680 м<sup>3</sup>/с из 11,2 тыс. м<sup>3</sup>/с. В США на централизованное водоснабжение используется в 3 раза больше подземных вод, на сельскохозяйственное водоснабжение — в 1,5 раза больше, а на орошение — в 3 раза больше воды.

Казалось бы, перспективы увеличения использования подземных вод в нашей стране значительны. Однако пример США не должен и не может

служить стимулом к резкому увеличению темпов освоения ресурсов подземных вод без должного на то основания.

Исследования показывают, что ресурсы подземных вод распределены территориально неравномерно и нередко там, где они особенно нужны, уже сейчас испытывается их недостаток. Не единичны случаи, когда для водоснабжения городов подземные воды в необходимых для этих целей количествах изыскиваются лишь на расстояниях до 100–150 км. Процент использования подземных вод в ряде южных республик уже достаточно высок. Так, по данным Н.И. Плотникова [1965], в Армении используется уже около 45% прогнозных эксплуатационных ресурсов, в Азербайджане — 55%, Туркмении — 37%, Молдавии — 25%, а средний прирост разведываемых ежегодно эксплуатационных запасов в стране составляет до 100 м<sup>3</sup>/с. И если такими же темпами эти запасы будут осваиваться, то возможности увеличения использования подземных вод будут довольно быстро исчерпаны.

Поэтому планы освоения подземных вод должны базироваться, с одной стороны, на научно обоснованном долгосрочном прогнозе роста и хозяйственно-питьевого водопотребления, а с другой — на детальных оценках ресурсов подземных вод. Дальнейшее увеличение использования подземных вод должно сопровождаться разработкой принципов и методов их рационального освоения.

Среди задач или проблем рационального использования подземных вод, требующих решения, можно вызвать следующие.

1. Разработка и усовершенствование методов более детальной оценки ресурсов подземных вод с учетом всех наиболее существенных, но ранее не принимавшихся во внимание резервов. В числе таких резервов можно отметить возможное увеличение запасов подземных вод за счет снятия или уменьшения величин непродуктивного испарения с поверхности грунтовых вод в процессе их эксплуатации; более детальный учет увеличения во времени питания подземных вод за счет их перетекания из смежных водоносных горизонтов; оценку возможного использования имеющихся ресурсов солоноватых подземных вод; учет неравномерности сезонного и многолетнего питания подземных вод в целях более полной сработки емкости водоносных горизонтов в маловодные периоды при обоснованной гарантии полного восполнения сработанных запасов в последующие многоводные периоды. С последней задачей связано обоснование оптимальной обеспеченности питания подземных вод, закладываемой в расчеты, что позволит повысить их естественные ресурсы иногда в 1,5–3 раза по сравнению с обычно принимаемым в расчеты минимальным (95%-ной обеспеченности) питанием подземных вод (Ковалевский, Семькина, 1980).

Повышение точности оценки эксплуатационных запасов подземных вод на действующих и разведываемых водозаборах позволит в одних случаях избежать новых разведочных работ, строительства новых водозаборов, так как заявленные потребности могут быть удовлетворены местными ресурсами в районе действующих водозаборов, в других же, наоборот, обосновать срочность принятия альтернативных решений водообеспечения отдельных районов за счет каких-либо иных источников (переброска части стока, опреснение вод и др.).

2. Разработка методов прогноза различных последствий, вызванных влиянием хозяйственной деятельности человека на подземные воды. Подземные воды — это не только часть гидросферы Земли, но и часть окружающей нас среды. Поэтому нарушение естественного режима и естественных условий формирования ресурсов подземных вод в ряде случаев ведет к существенным экологическим изменениям. Так, интенсивная эксплуатация подземных вод может вызвать угнетение или даже гибель лесов, влаголюбивой растительности, изменение качества подземных вод, активизацию карстово-суффозионных процессов, просадки земной поверхности, снижение поверхностного стока, переосушение земельных сельскохозяйственных угодий, обмеление озер и изменение их растительного и животного мира, создание благоприятных условий для размножения саранчи и др.

Проведение различных водохозяйственных агро- и лесотехнических мероприятий (создание прудов, водохранилищ и каналов, орошение земель поверхностными водами, распашка территорий, вырубка лесов и т.д.) также изменяет режим, баланс и ресурсы подземных вод. В одних случаях эти изменения имеют благоприятный характер: увеличиваются питание и запасы подземных вод, создаются новые водоносные горизонты, формируются запасы (линзы) пресных вод на соленых, в других — ухудшают гидрогеологические условия (приводят к засолению почв и подземных вод, подтоплению и заболачиванию земель, снижают восполнение запасов подземных вод в долинах рек при работе в них водозаборов за счет уменьшения числа и интенсивности паводков).

Подобные хозяйственные мероприятия создают многолетние тренды в режиме уровней и расходов подземных вод, которые в ряде случаев нельзя не учитывать при оценках ресурсов подземных вод и гидрогеологических прогнозах. Количественная характеристика всех этих изменений имеет также большое практическое значение, а в ряде случаев в связи со слабой изученностью некоторых вопросов (например, закономерностей развития карстовых процессов, генетической природы многолетней изменчивости режима подземных вод и др.) также большое методическое и теоретическое значение.

3. Разработка комплексных водохозяйственных решений как для ряда гидрогеологических задач одновременно, так и для комбинированного использования поверхностных и подземных вод. Примером подобных решений может служить комплексирование использования подземных вод для водоснабжения и орошения с вертикальным дренажом мелиорируемых территорий, осушение шахтных и карьерных полей с использованием дренажных вод для водоснабжения, повторное использование сточных и возвратных вод (достигающих 90% при коммунальном водоснабжении и 10–20% от используемых вод при орошении).

Наиболее перспективно комбинированное использование поверхностных и подземных вод. Так, для орошения подземные воды интенсивно могут использоваться лишь в отдельные маловодные годы, в которые будет осуществляться сработка естественных запасов с полным или частичным прекращением эксплуатации подземных вод в многоводные годы, когда будут использоваться поверхностные воды и восполняться запасы подземных вод. За рубежом уже практикуется подпитывание рек

в маловодные периоды за счет подземных вод. В маловодные периоды в течение 2—3 месяцев производится форсированная сработка емкостей водоносных горизонтов и сброс подземных вод в реки. Водозаборы при этом закладываются на таком расстоянии от реки, при котором ущерб речному стоку за период межени практически не улавливается. Восполнение сработанных емкостей осуществляется в последующие многоводные периоды года. Близкое к такому (по характеру) подземное регулирование поверхностного стока осуществляется или планируется в районах ряда водозаборов Казахстана (на реках Нура, Шурубай-Нура, Сарысу), Украины (Северский Донец) и в других районах, где в летние и зимние периоды осуществляется значительная сработка емкости водоносных горизонтов водозаборами с последующим полным восполнением запасов подземных вод паводочными водами рек. Десятки кубометров в секунду пресной воды можно, например, сбросить в Сырдарью в отдельные маловодные периоды с богатых подземными водами конусов выноса Ферганы и прилегающих предгорий с последующим естественным восполнением этих запасов за счет рек. Масштабы подобного использования подземных вод можно значительно увеличить, если комбинировать естественное восполнение с искусственным. Аналогичное подпитывание подземных вод в маловодные периоды может осуществляться и вдоль трасс перебросок стока. Все эти вопросы требуют специального обоснования и расчетов, и прежде всего изучения закономерностей многолетней изменчивости ресурсов подземных вод.

4. Создание научных основ управления ресурсами подземных вод. Эта фундаментальная стратегическая научная проблема включает в себя исследование процессов формирования подземных вод, разработку теории и методов гидрогеологического прогнозирования и создание моделей управления режимом и ресурсами подземных вод, включая создание постоянно действующих моделей крупных регионов. Подобные модели должны базироваться на вскрытых гидравлических взаимосвязях поверхностных и подземных вод, установленной стохастической временной изменчивости колебаний ресурсов поверхностных и подземных вод и экономических оценках, оптимизирующих формы рационального освоения водных ресурсов отдельных бассейнов в целом.

Изучение процессов формирования подземных вод базируется на накопленных обширных региональных эмпирических данных, экспериментальных и теоретических исследованиях, направленных на выявление пространственно-временных закономерностей формирования режима и баланса подземных вод, количественных связей между основными режимобразующими факторами и условиями, определяющими изменчивость режима и ресурсов подземных вод во времени и пространстве. Особое внимание при этом уделяется изучению формирования подземных вод во взаимосвязи эндогенных и экзогенных факторов в процессе геологического круговорота воды на Земле, палеогидрогеологическим реконструкциям, применению методов гидрогеодинамики, гидрогеотермии и гидрогеохимии для описания процессов формирования подземных вод.

Разработка основ гидрогеологических прогнозов возможных изменений количества и качества подземных вод во времени под влиянием естест-

венных факторов и процессов и под воздействием различной хозяйственной деятельности человека базируется на вскрытых закономерностях формирования подземных вод и заключается в создании физических, детерминированных математических и вероятностно-статистических моделей прогнозируемых процессов. Подобное моделирование должно учитывать взаимосвязь подземных вод с другими природными процессами на Земле, управляющими изменчивостью водных ресурсов вообще и подземных вод в частности. Только на базе глубокого познания процессов формирования подземных вод можно строить модели управления их режимом в нужном для человечества направлении.

Из перечисленных вопросов видно, что проблема оптимизации использования подземных вод весьма многогранна и требует обширных и разноплановых научных исследований.

В настоящей работе автор поставил перед собой цель: рассмотреть и изучить пространственно-временные закономерности формирования режима уровней подземных вод и подземного стока в многолетнем аспекте и разработать на этой основе методы или приемы учета многолетней изменчивости ресурсов подземных вод в целях их рационального использования.

Решение первой задачи осуществлялось в плане изучения и анализа существования и значимости многолетних трендов в режиме уровней подземных вод и подземного стока, а также в изучении закономерностей проявления синхронности и асинхронности режима подземных вод на территории СССР как основы для экстраполяции данных изменчивости ресурсов, режима и их прогнозов в пространстве.

Решение второй задачи осуществлялось в плане оценки перспектив долгосрочного и сверхдолгосрочного прогнозирования режима уровней подземных вод и подземного стока, на основе временной экстраполяции трендов, выявленной достоверной цикличности и случайных колебаниях; на основе анализа чередований серий маловодных и многоводных лет для расходов подземных вод (подземного стока) заданной обеспеченности и обоснований оптимальных расчетных обеспеченностей, используемых для оценок эксплуатационных запасов подземных вод; в рассмотрении путей наращивания коротких рядов наблюдений, необходимых для корректного статистического их анализа в целях прогнозов режима, а также в рассмотрении и апробации некоторых видов гидрогеологических исследований, обеспечивающих эффективное решение вопросов количественной оценки степени воздействия водоотбора на окружающую среду.

Следует отметить, что перечисленные проблемы в тех или иных аспектах уже неоднократно рассматривались как самим автором, так и рядом других исследователей [Токарев, 1962; Доброумов, 1969; Коноплянцев, Семенов, 1974, 1979; Великина, Зекцер, 1975; Зекцер, 1977; Кумсиашвили и др., 1978; и др.]. Однако эти вопросы во многом еще недостаточно изучены для широкого практического их внедрения. Поэтому в данной работе основное внимание было уделено прежде всего тем аспектам, которые могут быть учтены в гидрогеологических расчетах или прогнозах, а также ранее не рассматривавшимся вопросам. В частности, впервые изучены синхронность и асинхронность режима уровней подземных вод и подземного стока для всей территории СССР, существование

и интенсивность темпов многолетней направленной изменчивости трендов подземного стока, региональные закономерности проявления цикличности, характер вероятностных законов распределения подземного стока для различных районов СССР, проанализированы продолжительности и возможные чередования серий маловодных и многоводных лет в подземном стоке СССР, предпринята попытка нарастить ряды наблюдений по связям с темпами накопления льда в ледниках. В работе рассмотрен также вопрос о влиянии интенсивной эксплуатации подземных вод на активизацию карстовых процессов. Для решения этой задачи впервые была проведена комплексная гелиевая и тритиевая съемка. Учет подобных нарушений в окружающей среде необходим для обоснования оптимальных форм рационального использования подземных вод.

В сборе и анализе материалов, а также в подготовке данной рукописи большую помощь автору оказали В.Л. Злобина, Н.Г. Максимова, Г.И. Семькина, Т.В. Пудова, А.К. Чихачев, за что автор приносит им свою благодарность.

## ХАРАКТЕРИСТИКА ИСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ДЛЯ АНАЛИЗА И ОБОБЩЕНИЙ

### СОСТАВ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ И ОЦЕНКА ИХ ПРИЕМЛЕМОСТИ

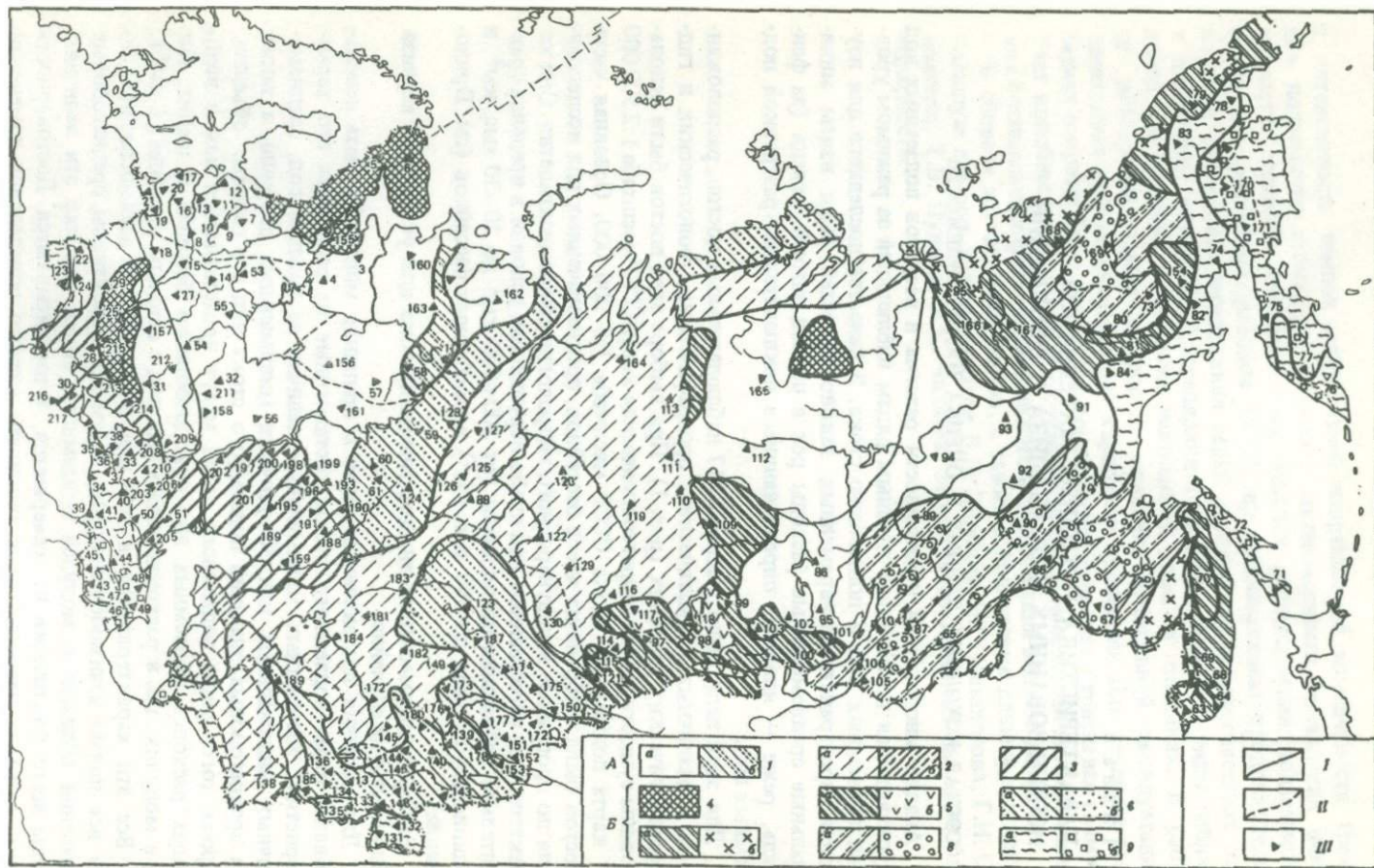
Анализ многолетней изменчивости режима и ресурсов подземных вод производился по наиболее длинным рядам наблюдений за режимом уровней подземных вод и подземного стока. В качестве последнего для изучения пространственно-временных закономерностей были взяты минимальные среднемесячные расходы рек в период зимней межени (за февраль, реже — январь), определяющиеся исключительно разгрузкой подземных вод.

Для этой цели было выбрано 217 наблюдательных постов, расположенных в различных климатических, орографических, геологических и гидрогеологических условиях (рис. 1). При выборе этих постов были использованы существующие гидрогеологическая карта СССР масштаба 1:2 500 000 и карта подземного стока СССР масштаба 1:5 000 000. Основная часть постов была выбрана из числа бассейнов, предназначенных для исследования по программе Международного гидрологического десятилетия. Они характеризуют естественные или слабо нарушенные условия в пределах сравнительно небольших по площади (от 300—600 км<sup>2</sup> до 20—30 тыс. км<sup>2</sup>, в единичных случаях до 300 тыс. км<sup>2</sup>) водосборных бассейнов (см. Приложение).

Выбор среднемесячных зимних значений стока для указанного анализа был сделан не случайно.

Для решения поставленных задач в принципе могли бы быть использованы ряды подземного стока, составленные из различных его характеристик: абсолютных минимальных величин за каждый год, среднемесячных минимальных или 30-суточных минимальных значений, а также из среднегодовых значений подземного стока или его годовых объемов. Кроме того, ряды подземного стока могут представляться как в величинах расходов подземных вод с водосборного бассейна в целом, так и в модулях, т.е. в расходах подземных вод с единицы площади (1 км<sup>2</sup>).

Все эти характеристики в той или иной степени взаимосвязаны, но не все прямо взаимообусловлены. Наименее объективны среднегодовые значения объемов и модулей подземного стока, так как эти величины чаще всего фактически не измеряются, а рассчитываются. Достоверность этих расчетов невелика из-за трудности точного определения изменений



величин разгрузки подземных вод в реку в период паводка. Это справедливо как для водоносных горизонтов, гидравлически не связанных, так и связанных или частично связанных с рекой. Часто не менее трудно выделить подземную составляющую в поверхностном стоке в летнюю межень. Все это может привести к существенным ошибкам в определении истинных величин годовых объемов или расходов подземного стока. В связи с этим для анализа временных и региональных закономерностей режима подземных вод, как правило, использовались наиболее объективные, фактически измеренные минимальные расходы рек. Кроме того, как известно, минимальные годовые значения подземного стока, выраженные в абсолютных величинах стока или в модулях, представляют часто разнородные по условиям формирования стока ряды, так как абсолютными минимальными в различные годы могут оказаться то летние, то зимние расходы рек. Поэтому в целях достижения однородности (однофазности) выборки для анализа многолетней изменчивости подземного стока использовались либо только зимние, либо только летние минимальные значения, в зависимости от того, в какой период года в данном районе наиболее часто встречаются минимальные годовые значения стока.

При выборе минимальных меженных значений подземного стока предпочтение нами было отдано среднемесячным зимним величинам. Изменчивость подземного стока в эти периоды обычно мала, и поэтому величины среднемесячных и 30-дневных средних расходов практически одинаковы. Вместе с тем среднемесячные значения стока могут быть получены без дополнительных подсчетов непосредственно из публикуемых материалов. Использование среднемесячных минимальных значений надежней по сравнению с минимальными абсолютными величинами по той причине, что наблюдающиеся колебания величин стока в межень, включая абсолютные минимальные его значения, определяются в основном

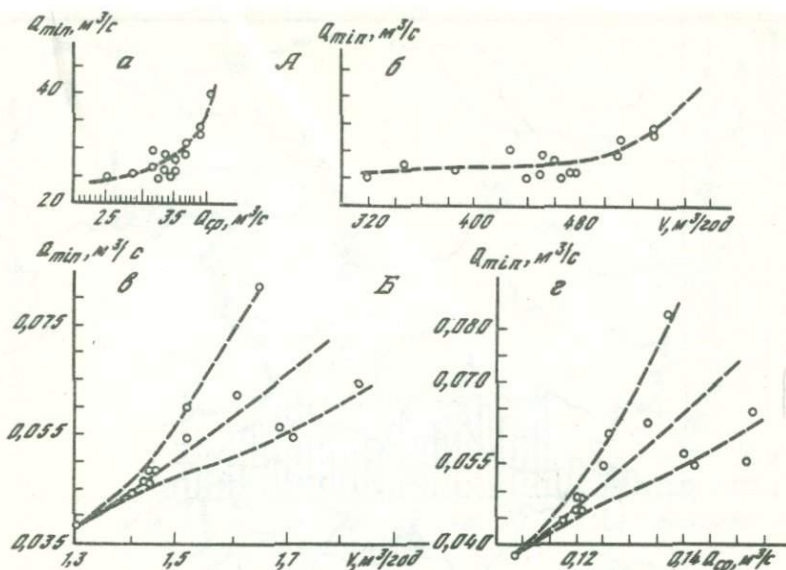
Рис. 1. Схема размещения наблюдательных створов за режимом подземного стока

Гидрогеологические районы: *A* — районы преобладающего развития артезианских и грунтовых вод осадочных отложений преимущественно равнинных областей в пределах плит платформ и прилегающих к ним краевых прогибов (артезианские бассейны) с подчиненным распространением подземных вод экзогенной и эндогенной трещиноватости; *1a* — гидрогеологические районы древних плит с докембрийским основанием и прилегающих краевых прогибов; *1б* — подчиненные им районы горноскладчатых сооружений; *2a, б* — то же, молодых плит с палеозойским основанием; *3* — гидрогеологические районы, охватывающие смежные части древних и молодых плит; *Б* — районы преимущественно грунтовых вод зоны экзогенной трещиноватости горных пород и напорных вод локальных трещинных зон дизъюнктивных тектонических нарушений в пределах шитов древних платформ и горноскладчатых областей (бассейны трещинных вод) с подчиненным распространением артезианских и грунтовых вод рыхлых отложений; *4* — гидрогеологические районы шитов древних платформ; *5a* — гидрогеологические районы древних складчатых сооружений; *5б* — подчиненные им районы (второго порядка) распространения артезианских вод; *6a, б* — то же, палеозойских складчатых сооружений; *7a, б* — то же, преимущественно мезозойских складчатых сооружений; *8a, б* — то же, преимущественно складчатых сооружений от древнейших (шиты) до мезозойских; *9a, б* — то же, молодых (альпийских и тихоокеанских) горноскладчатых сооружений; *I, II* — гидрогеологические границы первого и второго порядков. (Районирование дано по Гидрогеологической карте М-ба 1 : 2 500 000 под редакцией В.И. Духаниной и Н.А. Маринова, 1964); *III* — наблюдательные створы

лишь точностью гидрологических замеров, погрешности которых достигают 5%. Среднемесячные же значения за период минимальных расходов рек отражают осредненные, близкие к истинным значения минимального подземного стока. Таким образом, для исследования многолетней изменчивости режима подземного стока или величин разгрузки подземных вод в реки нами использовались в основном среднемесячные значения расходов рек за январь или февраль. Лишь для некоторых бассейнов рек Средней Азии, где минимальные годовые расходы рек фиксируются летом, анализировались соответственно минимальные среднемесячные летние расходы рек. Практическое отсутствие атмосферных осадков в этом районе в данный период года позволяет рассматривать меженные расходы рек как результат только разгрузки подземных вод, в которой уже отражены сформировавшиеся за многие годы условия хозяйственной деятельности людей, т.е. использование поверхностных вод на орошение. В этих и ряде других освоенных районах не исключена возможность, что на характере многолетней изменчивости режима подземного стока сказывается интенсификация использования водных ресурсов. Это, возможно, отразится на характере многолетних трендов в режиме подземных вод, что будет показано далее.

Для оценки того, насколько многолетняя изменчивость среднемесячных зимних или летних расходов рек может характеризовать многолетнюю изменчивость годовых объемов подземного стока, были сопоставлены эти значения по 20 постам, расположенным в различных природных условиях. Это сопоставление показало наличие корреляционных связей между ними. Наиболее высокие коэффициенты (до 0,64–0,76) отмечаются в связях минимальных годовых и среднегодовых модулей подземного стока, оцениваемых по методу Б.И. Куделина, а также между минимальными годовыми модулями и суммарным годовым объемом подземного стока. Связи минимальных среднемесячных зимних значений подземного стока с минимальными годовыми и среднегодовыми модулями подземного стока бывают и невысокими ( $r = 0,12-0,58$ ). Это определяется часто нелинейностью этих связей (рис. 2), а также неточностью расчетов среднегодовых значений подземного стока и его годовых объемов. Особенно велики расхождения между расчетными и истинными значениями среднегодовых расходов и годовых объемов подземного стока в многоводные годы за счет сложности точного расчленения поверхностной и подземной составляющих в речном стоке. Тем не менее общая многолетняя изменчивость подземного стока, оцениваемая по различным показателям, в целом аналогична. В частности, автокорреляционные функции сравниваемых рядов показывают тенденции к идентичной цикличности (естественно, лишь там, где она имеется), а интегральные графики — в общем одинаковую направленность в многолетней изменчивости подземного стока.

По отдельным створам автокорреляция разных характеристик подземного стока показывает иногда несколько различную длину периодов циклов, отличающихся на 1–2 года. Однако существенно различными автокорреляционные функции бывают лишь в тех случаях, когда цикличность в структуре анализируемых рядов статистически незначима, т.е. практически случайна, когда можно говорить лишь о наличии тен-



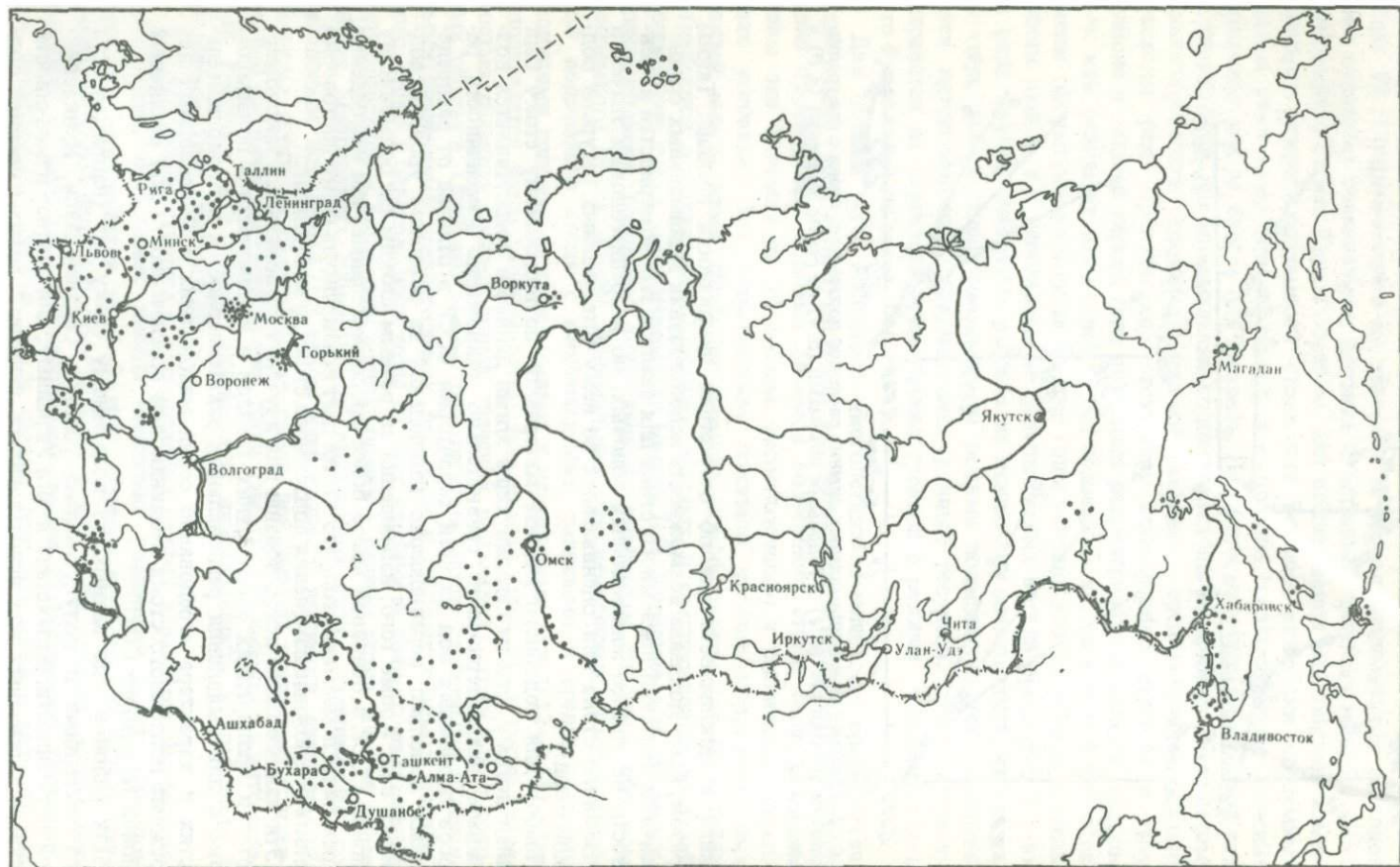
Р и с. 2. График связи минимальных зимних расходов подземного стока с его среднегодовыми значениями (а, г) и годовыми объемами (б, в) по рекам Медвенка (а, б) и Коккозка (в, г)

денций к цикличности или об отсутствии цикличности вообще. Таким образом, была доказана возможность использования минимальных среднемесячных значений подземного стока для анализа закономерностей изменчивости не только минимальных годовых, но и среднегодовых значений подземного стока или оцениваемых по нему естественных ресурсов подземных вод.

Выбор для подобного анализа материалов по подземному стоку был сделан потому, что на сегодня лишь этими данными представляется возможным охарактеризовать сравнительно равномерно изменчивость ресурсов подземных вод на всей территории СССР в отличие от распределенных довольно неравномерно наблюдений за режимом уровней подземных вод. Кроме того, наблюдения за речным стоком по большинству районов СССР в основной массе более продолжительные, чем наблюдения за режимом подземных вод, что также дает возможность более достоверно оценить возможные изменения подземного стока за многолетие.

Эти данные были использованы для изучения региональных закономерностей в проявлениях многолетних трендов и цикличности в подземном стоке и для выявления региональных закономерностей в продолжительностях и характере чередований серии маловодных и многоводных лет в режиме подземного стока неодинаковой обеспеченности для различных районов территории СССР.

Для районов, где данных по подземному стоку нет (например, для ряда пустынных и полупустынных районов Средней Азии, Прикаспийской низменности, Казахстана и юга Украины), для анализа изменчивости ресурсов подземных вод использовались данные о режиме уровней под-



Р и с. 3. Схема размещения наблюдательных скважин, использованных для анализа режима уровней подземных вод

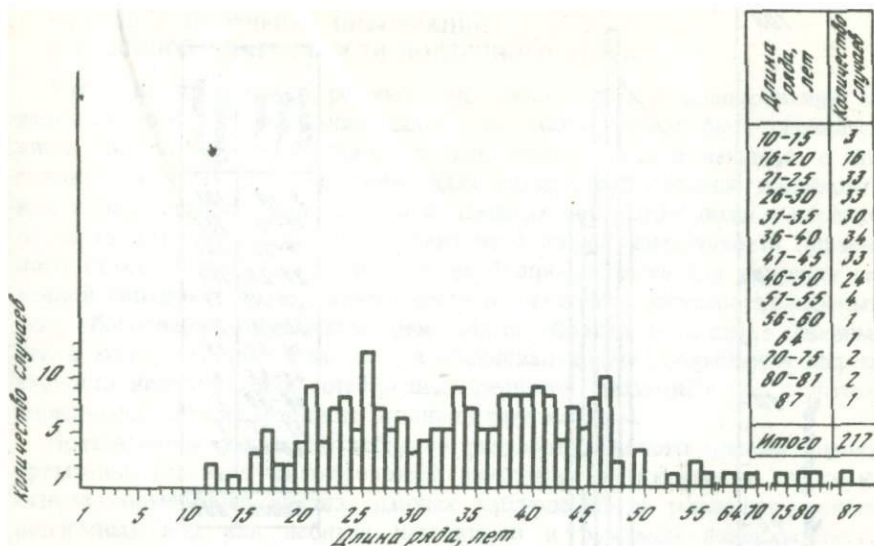


Рис. 4. Гистограмма распределения рядов подземного стока по их продолжительности

земных вод. Эти материалы легли в основу трендового анализа многолетней изменчивости ресурсов подземных вод и решения ряда других самостоятельных вопросов. По данным продолжительных наблюдений за режимом уровней подземных вод (как по отдельным опорным точкам, так и по составленным обобщенным региональным характеристикам режима подземных вод) была проанализирована региональная асинхронность и синхронность режима подземных вод для территории СССР. Для данного анализа было использовано 855 рядов наблюдений по специальным наблюдательным скважинам и родникам.

По всем собранным рядам построены хронологические и интегральные графики, графики обеспеченности, обобщенные (по группам точек) площадные хронологические графики в процентах обеспеченности. По каждому ряду рассчитаны основные статистические параметры: среднегодовые значения, среднеквадратические отклонения, коэффициенты вариации; определены модули подземного стока различной обеспеченности; выполнены расчеты многолетних линейных и нелинейных трендов, а также цикличности тремя способами: по автокорреляции, спектральному анализу и методом Н. Шустера; оценена статистическая достоверность вскрытых циклов и их весовые вклады в общий размах многолетних колебаний.

Для исследования региональной синхронности и асинхронности режима подземных вод и подземного стока использовались кросскорреляционный, факторный и трендовый анализы, метод распознавания образов. Методика большинства перечисленных видов анализа временных рядов широко освещена в литературе, в том числе применительно к анализу режима подземных вод [Ковалевский, 1974, 1976], и поэтому мы на

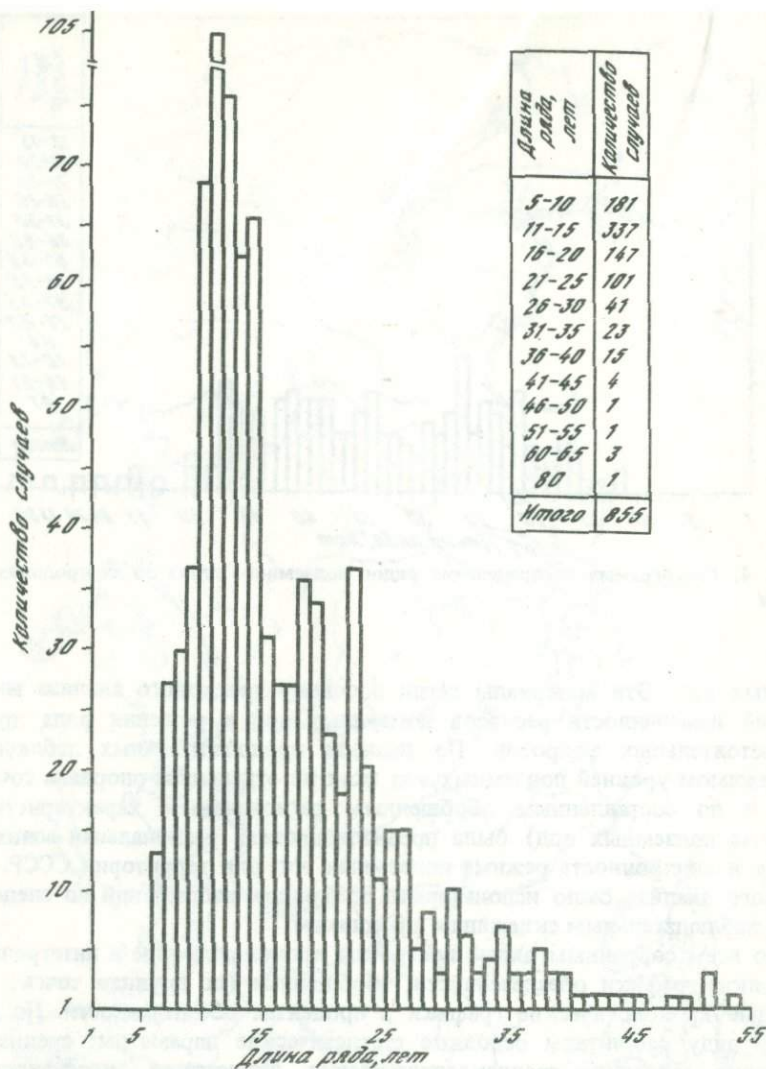


Рис. 5. Гистограмма распределения продолжительности наблюдений за уровнями подземных вод по скважинам

ней здесь не останавливаемся. Некоторые особенности применения этих методик будут рассмотрены в соответствующих главах.

Характер распределения проанализированных данных наблюдений за режимом уровней подземных вод по территории СССР, а также характеристики продолжительности наблюдений отражены на рис. 3-5.

## МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О СЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПОДЗЕМНОГО СТОКА

Учет закономерностей режима подземных вод при планировании их рационального использования далеко не всегда может быть ограничен лишь многолетней изменчивостью подземного стока и данными о его годовых объемах. Для многих задач управления режимом подземных вод и оптимизации эксплуатации подземных вод необходимы и нередко более важны представления о характере сезонной изменчивости подземного стока. Такие характеристики необходимы также для изучения сезонной синхронности и асинхронности восполнения ресурсов подземных вод, обоснования оптимальных режимов переброски части стока северных рек в южные районы, а также для обоснования путей повышения эффективности использования естественных ресурсов подземных вод с учетом неравномерности их сезонного питания и других задач.

Поставленная задача потребовала разработки нового приема оценки временной сезонной и многолетней изменчивости подземного стока на основе совместного анализа данных наблюдений за режимом уровней подземных вод или дебитов источников и режимом поверхностного стока.

Известно [Макаренко, 1948; Куделин, 1960; Бочевер и др., 1969], что представления о сезонной изменчивости ресурсов подземных вод можно было бы получить по суммарной кривой дебита всех родников в пределах изучаемого бассейна. При наличии длительных наблюдений за режимом родников в пределах какого-то бассейна, подземные воды которого дренируются только родниками, эта задача теоретически разрешима, но практически трудно реализуема. Более того, в большинстве случаев разгрузка подземных вод осуществляется не только одними родниками, но и гидравлическим путем непосредственно в реки. Метода оценки сезонной изменчивости подземного стока в реки для такого случая не существует. Имеющиеся методы расчленения гидрографа рек [Куделин, 1960; Веригин, 1963; и др.] не позволяют оценить такую изменчивость, так как из-за наличия берегового регулирования подземного стока (т.е. когда река в паводок подпитывает водоносные горизонты) определить величину подземного стока<sup>1</sup> по гидрометрическим данным не представляется возможным.

Следует отметить, что принципиальное расчленение речного стока на собственно поверхностную и подземную составляющие возможно на основе анализа изотопного или гидрохимического состава этих вод. Методические основы таких подходов рассматривались в ряде работ [Иванов, 1948; Балашов, 1959; Зекцер, 1963; Романов, и др., 1981]. Однако для корректного решения данной задачи необходима довольно обширная информация о сезонном и многолетнем гидрохимическом режиме поверхностных и особенно подземных вод в пределах всего водосборного бассейна и по различным водоносным горизонтам, а также о гидрохимических процессах, протекающих в условиях взаимосвязи этих вод. Такой информации о химическом, а тем более об изотопном составе, как

<sup>1</sup> Под подземным стоком понимается расход потока подземных вод в единицу времени с какого-то водосборного бассейна.

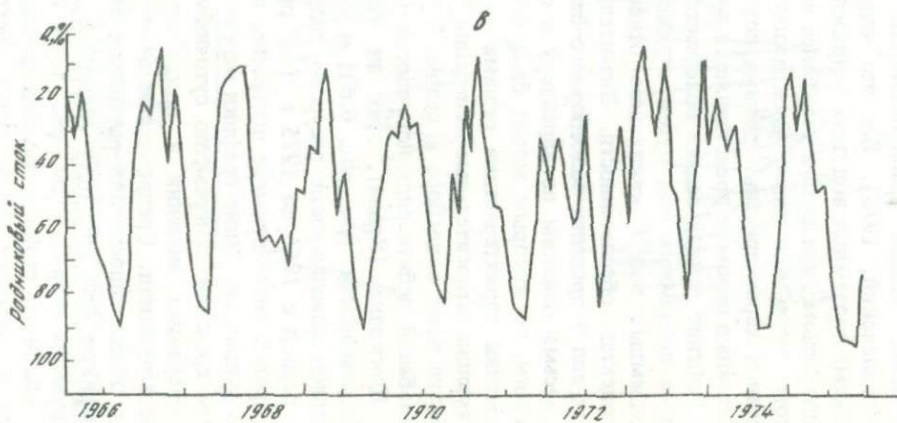
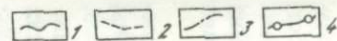
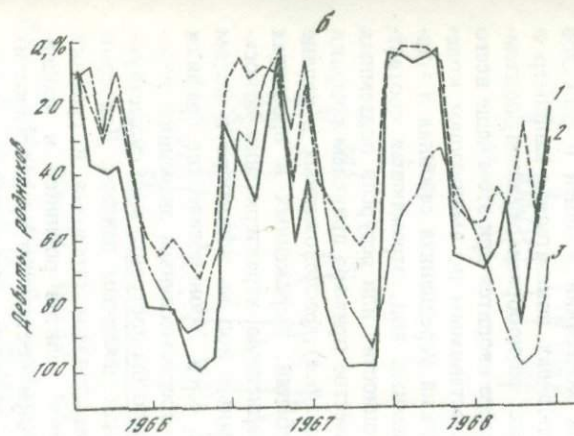
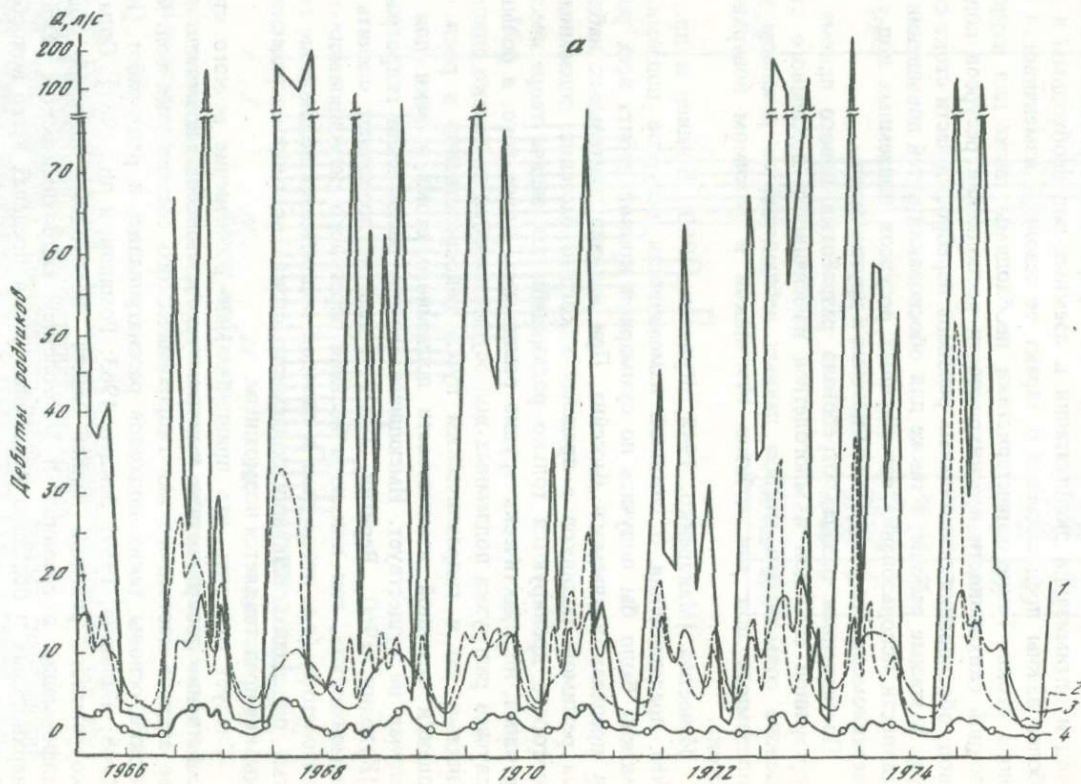


Рис. 6. Графики колебаний дебитов родников в долине р. Коккозка (а), то же, но в процентах обеспеченности (б) и обобщенная региональная характеристика режима родникового стока (в)  
 1 - источник 181; 2 - источник 181а; 3 - источник 63; 4 - источник 150

правило, нет. Поэтому, принимая во внимание возможность получения необходимой исходной информации о сезонных и многолетних изменениях подземного стока, эта задача на сегодня может быть решена только на основе совместного анализа режима подземных вод и поверхностного стока. Основывается это решение на нахождении обобщенной характеристики режима подземных вод для какого-то водосборного бассейна в целом и эквивалентной ей величины расходов подземных вод для этого же бассейна.

Известно, что характер и разнообразие режима подземных вод в пределах какого-то водосборного бассейна (степень динамичности и величины амплитуд колебаний дебитов и уровней, темпы их спадов и подъемов, число и продолжительность периодов минимальных и максимальных положений) зависят от особенностей и разнообразия гидрогеологических условий в этом бассейне. Основную роль при этом играют литологический состав водовмещающих пород и пород зоны аэрации, глубины залегания подземных вод, особенности рельефа и микрорельефа, граничные условия, степень дренированности отдельных водоносных горизонтов [Ковалевский, 1973]. Все это определяет разнообразие особенностей режима подземных вод даже в пределах ограниченных территорий в одном водоносном горизонте и тем более в различных горизонтах. Выбрать при этом какую-либо типичную скважину или родник в качестве единой обобщенной характеристики режима подземных вод для всего водосборного бассейна в целом не представляется возможным.

Решение данной задачи облегчается нормированием характеристик режима подземных вод путем отражения колебаний уровней и расходов подземных вод в каких-либо относительных показателях, например в процентах обеспеченности. Значительное разнообразие режима подземных вод в пределах водосборного бассейна сводится при этом чаще всего к весьма близким по характеру и сопоставимым по амплитудам колебаниям, по которым может быть получена усредненная сезонная и многолетняя характеристика режима подземных вод, отражающая соответствующие относительные изменения "водности" или ресурсов подземных вод на всем водосборе в целом. В качестве примера приведем графики колебаний дебита ряда источников (рис. 6,а), расположенных в долине р. Коккозка (Крым), этих же колебаний, выраженных в процентах обеспеченности (см. рис. 6,б), и усредненную характеристику относительной изменчивости ресурсов подземных вод на водосборе в целом за период с 1966 по 1975 г. (см. рис. 6,в). Хронологические графики в приведенном примере построены по среднемесячным значениям дебитов родников. Такие графики можно было бы построить и по существующим срочным замерам, по суточным или декадным данным. Для соответствующих значений в таком случае должны строиться и графики обеспеченности. Среднемесячные значения дебитов родников в процентах обеспеченности для различных лет при построении хронологических графиков (см. рис. 6,б) снимались с графиков обеспеченности. Результирующая кривая (см. рис. 6,в) отражает изменчивость суммарного родникового стока в бассейне данной реки, выраженного в относительных показателях. Аналогичные построения, но для уровней грунтовых вод по ряду наблюдательных скважин, расположенных в бассейне р. Мед-

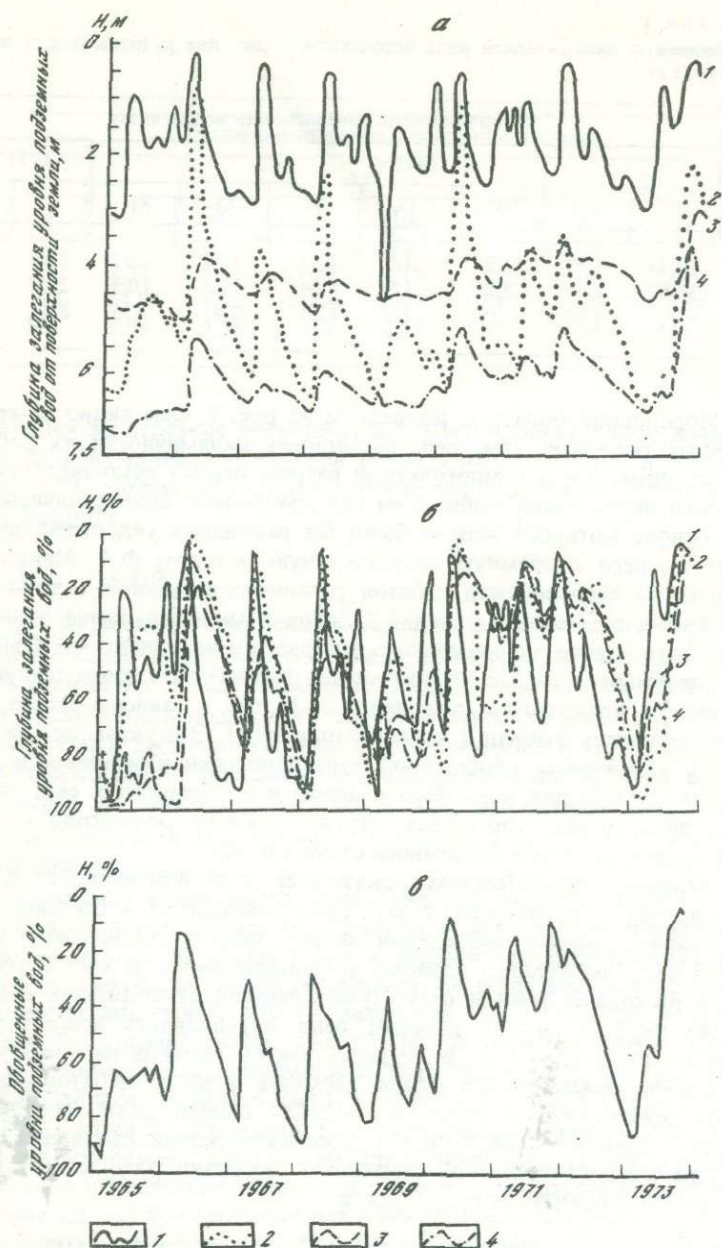


Рис. 7. Графики колебаний уровней грунтовых вод по скважинам

1 - № 133; 2 - № 149; 3 - № 131; 4 - № 13 в бассейне р. Медвенка (а), то же, но в процентах обеспеченности (б) и обобщающая средняя региональная характеристика режима подземных вод (в)

Таблица 1

Коэффициенты динамичности ряда источников в бассейне р. Коккозка за период 1970–1971 гг.

Номер источника	Коэффициенты динамичности по месяцам									
	1970 г.							1971 г.		
	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	
181a	10,71	4,57	3,0	1,1	1,15	5,51	2,92	7,04	5,14	
181	30,02	2,34	2,86	1,9	1,64	29,3	10,3	21,0	37,3	
150	9,21	4,03	2,03	1,5	1,27	3,4	2,15	8,67	5,98	

венка (Московская область), приведены на рис. 7. Как видно из графиков режима родников (см. рис. 6), степень динамичности их дебитов как в сезонном, так и в многолетнем разрезе весьма различна. Поэтому практически невозможно выбрать из них какой-либо один типичный родник, на основе которого можно было бы расчленить гидрограф реки и выделить из него подземную составляющую методом Ф.А. Макаренко. Коэффициенты динамичности дебитов различных родников (т.е. отношение различных временных значений дебитов к минимальному) отличаются для одного и того же временного интервала в несколько раз (табл. 1) и доля подземного стока в речном может изменяться в соответствующих диапазонах (в приведенном примере в 3–15 раз, в зависимости от того, какой из родников выбран в качестве опорного). Это указывает на необходимость нахождения обобщенной характеристики изменчивости режима подземных вод для водосбора в целом и представления ее в относительных показателях, способных отразить режим родникового стока, уровней подземных вод и подземного стока в целом.

При переводе относительных показателей этой изменчивости в абсолютные величины подземного стока, разгружающегося в бассейне реки, использовались данные наблюдений за режимом поверхностного стока. Для этой цели выбирались периоды с минимальными за многолетие межгодовыми расходами реки и отсутствием жидких атмосферных осадков, т.е. такие периоды, когда расходы реки определялись исключительно разгрузкой подземных вод. В пределах такого периода на участках одновременного независимого спада расходов реки и дебитов источников, разгружающихся в пределах бассейна данной реки, определялся удельный подземный сток (рис. 8), соответствующий изменению расхода реки на единицу изменений суммарной разгрузки родникового стока, выраженной в процентах обеспеченности:

$$\beta = \frac{Q_{1P} - Q_{2P}}{q_{1,\%} - q_{2,\%}} \quad (\text{м}^3/\text{с},\%), \quad (1)$$

где  $Q_{1P}$  и  $Q_{2P}$  – расходы реки за два отрезка времени  $t_1$  и  $t_2$  периода независимого спада;  $q_{1,\%}$  и  $q_{2,\%}$  – величины суммарного подземного стока, выраженного в процентах обеспеченности, определяемые по гра-

Коэффициенты динамичности по месяцам										
1971 г.										
III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
4,12	2,71	1,78	1,60	1,32	1,12	1,0	1,0	2,82	7,56	
64,3	11,0	14,92	6,3	2,04	1,08	1,01	1,0	17,94	37,63	
12,6	8,0	4,54	3,33	2,12	1,42	1,15	1,0	1,09	4,03	

фику для тех же отрезков времени  $t_1$  и  $t_2$ . Затем, зная единицу изменения расхода реки на единицу изменений родникового стока (%) и режим этого стока (%), можно рассчитывать изменения подземного стока во времени по формуле

$$Q_i = Q_{\min} + \Delta q_i \beta, \quad (2)$$

где  $Q_{\min}$  – минимальный межгодовой расход реки;  $\Delta q_i$  – амплитуды колебаний суммарного родникового стока в процентах для каждого месяца года по отношению к минимальному ( $q_{\min}$ ). Аналогично может быть оценена изменчивость подземного стока по относительным (%) уровням подземных вод и дебитам источников одновременно. В этом случае вместо амплитуд колебаний родникового стока ( $\Delta q_i$ ) используются амплитуды колебаний уровней подземных вод ( $\Delta h_i$ ), выраженные также в процентах обеспеченности для каждого месяца года по отношению к минимальным уровням ( $h_{\min}$ ).

Для указанных целей могут быть выбраны любые скважины, расположенные в пределах изучаемого бассейна и даже за его пределами, но находящиеся вне зоны подпора рек и отражающие естественный характер изменений водности данной территории, т.е. в пределах зоны с синхронным режимом подземных вод [Ковалевский, 1976]. На рис. 9 приведены примеры произведенных охарактеризованным методом расчетов сезонной и многолетней изменчивости подземного стока по трем бассейнам рек Коккозки, (Крым), Касах (Армения) и Медвенки (Подмосковье).

Подобные расчеты, отражающие особенности изменений ресурсов подземных вод во времени, дают основу для оптимизации их использования и более точного определения общих естественных и эксплуатационных ресурсов подземных вод при региональных и локальных исследованиях. На основании рассчитанных таким способом среднемесячных величин подземного стока можно также легко получить и среднегодовые значения и годовые объемы подземного стока в реки, а также определить затем долю участия подземных вод в годовом поверхностном стоке.

Выполненные расчеты позволили более полно раскрыть природу и особенности режима подземного стока, что имеет и практическое и методическое значение. В частности, они показали, что далеко не каждая межень

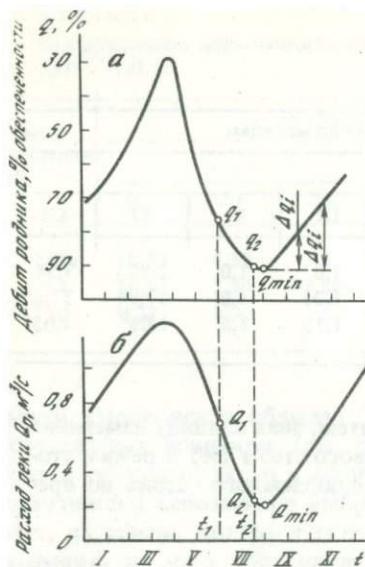


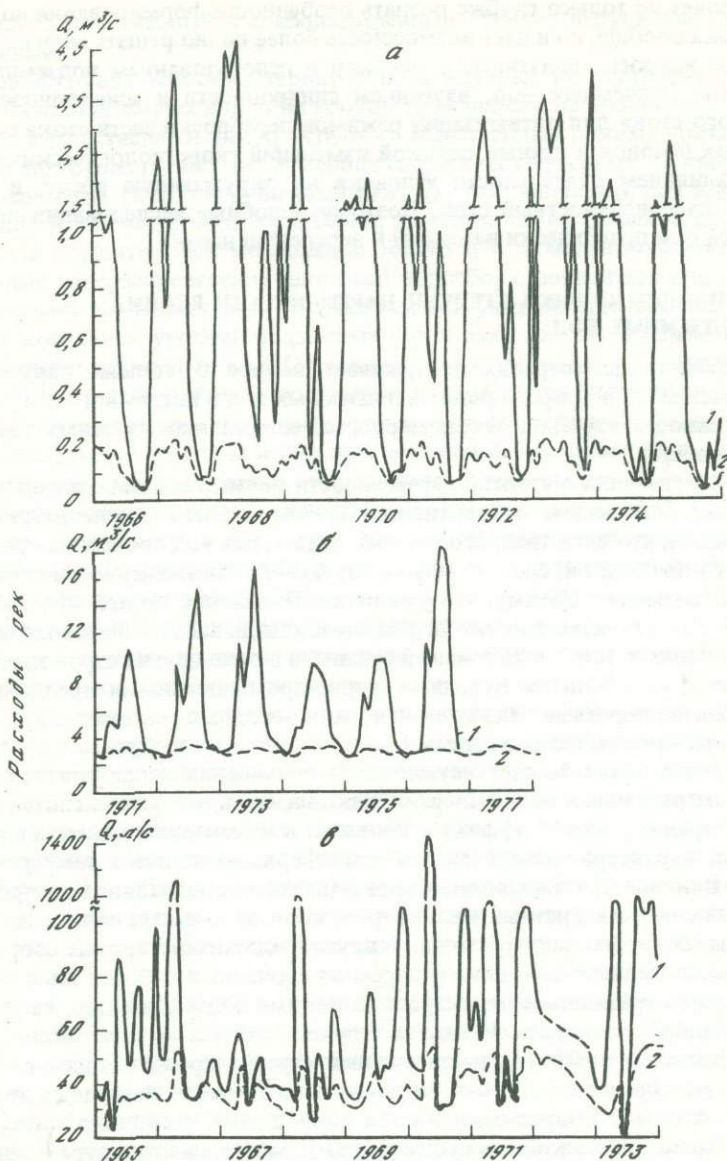
Рис. 8. Схема внутригодового режима родниковового стока в процентах обеспеченности (а) и режима реки (б)

поверхностного стока определяется только разгрузкой подземных вод. В многоводные годы, а также при поверхностном стоке, характеризуемом частыми паводками, меженные расходы рек часто складываются как из подземного, так и из поверхностного стока. Значительна доля поверхностного стока и в многолетних меженных расходах рек. По-видимому, за счет этого величины подземного стока, оцениваемые данным способом на ряде примеров, оказались на 20–30% меньше, чем оцененные методом Б.И. Куделина.

Предлагаемый способ определения величин подземного стока из водоносных горизонтов, дренируемых реками, можно применить и при наличии коротких рядов наблюдений, даже для одного года. Однако точность таких расчетов может оказаться невысокой, так как может случиться, что межень оцениваемого года ( $Q_{min}$ ) будет отражать не только подземный, но и поверхностный сток и за счет этого величина годового подземного стока будет завышенной.

Наличие длинных рядов одновременных наблюдений за режимом поверхностных и подземных вод в естественных условиях дает возможность оценивать долю разгрузки подземных вод в реки, даже если режим рек затем резко изменился в результате хозяйственной деятельности (при условии, если эти изменения не сказались на режиме подземных вод, по крайней мере, по источникам и скважинам, использованным для таких расчетов), а также рассчитывать величины подземного стока в реки, если в наблюдениях за последними были перерывы.

При отсутствии наблюдений за режимом подземных вод в пределах изучаемого бассейна для оценки подземного стока могут быть использованы данные наблюдений в соседних бассейнах или обобщенные региональные характеристики режима подземных вод, имеющиеся по каждой гидрогеологической станции страны. Эта возможность обосновывается тем, что относительные (по сравнению с многолетними нормами) изменения водности территории во времени, определяемые климатическими или погодными условиями отдельных лет, типичны для сравнительно больших территорий с синхронным режимом поверхностного и подземного стока. Составленные в процентах обеспеченности обобщенные региональные характеристики режима подземных вод отражают типичные для больших территорий относительные изменения режима подземных вод и поэтому могут быть использованы для приближенных оценок подземного стока указанным способом в бассейнах, где наблюдения за режимом подземных вод не проводились. Однако имеющиеся частные особенности формирования подземных вод отдельных бассейнов могут привести к тому, что величины подземного



Р и с. 9. Сопоставление многолетней и сезонной изменчивости поверхностного и подземного стока по бассейнам рек Коккозка (а), Касах (б) и Медвенка (в)  
 1 — поверхностный сток; 2 — подземный сток

стока, рассчитанного по обобщенным региональным характеристикам режима подземных вод, в отдельные годы несколько превысят меженные расходы рек. Это может происходить также за счет наличия временных сдвигов в режимах поверхностных и подземных вод.

Изучение закономерностей сезонной изменчивости подземного стока

позволяет не только глубже познать особенности формирования подземного стока вообще, но и дает возможность более полно решать многие практические вопросы, связанные с оценкой и использованием подземных вод, охраной подземных вод, изучением синхронности и асинхронности подземного стока для оптимизации режимов переброски части стока рек из северных районов в южные, оценкой изменений гидрогеологических условий под влиянием деятельности человека на окружающую среду, и прежде всего на поверхностный сток. Поэтому подобные исследования представляются нам практически важными и перспективными.

#### ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ НАРУШЕННОСТИ РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Особого рассмотрения заслуживает вопрос о степени нарушенности наблюдаемого в природе режима подземных вод и подземного стока и целесообразности изучения закономерностей естественного режима подземных вод вообще.

Представления о степени нарушенности режима подземных вод на сегодня пока еще весьма субъективны. Поэтому иногда можно встретиться с мнениями, что естественного режима подземных вод вообще не существует или его почти нет и, следовательно, изучать его закономерности нет смысла, да и невозможно потому, что уже негде. Появление такого мнения не случайно, так как известно, что огромные площади заняты сельскохозяйственными полями (около 20% нашей страны, а в ряде других стран значительно больше), населенными пунктами, горно-промышленными предприятиями, пересечены дорогами. Значительная часть основных рек зарегулирована, атмосфера запыляется различными промышленными выбросами, ее температура повышается за счет неуклонного повышения использования человечеством различных видов энергии, накопления в ней углекислоты, что создает "оранжерейный" эффект и приводит к изменениям климата планеты в целом, характера распределения атмосферных осадков и температур воздуха. Влияние крупных водозаборов и шахтных водоотливов распространяется на сотни квадратных километров, постоянно растет сеть каналов, оросительных систем, водохранилищ и других водохозяйственных сооружений, перераспределяющих водные ресурсы по площади, и т. д. Все это в какой-то мере уже отразилось и отражается на режиме подземных вод, на условиях их питания и разгрузки. И даже в "глухой" тайге и лесных массивах, занимающих около 60% территории нашей страны, произошедшие изменения в климате, безусловно, как-то отразились на режимах подземных вод и подземного стока. Вопрос заключается лишь в том, насколько существенны эти изменения, насколько существенно изменилась структура водного баланса Земли в целом и баланса подземных вод в частности, а следовательно, насколько сильно изменились сезонные и многолетние закономерности режима подземных вод. На эти вопросы дать определенный ответ трудно, так как они мало изучены.

Четкий ответ может дать лишь объективный анализ массовых многолетних наблюдений за режимом подземных вод, позволяющий раскрыть механизмы и закономерности формирования режима и баланса подземных вод.

По соотношению воздействий на подземные воды естественных и искусственных факторов режим подземных вод можно четко подразделить на

три группы: естественный и слабонарушенный, сильно нарушенный и искусственный.

К первой группе относятся территории, на которых искусственные факторы режима подземных вод либо вообще практически не проявились (т. е. сохранился естественный или практически естественный режим), либо проявились, но существенно не изменили общих естественных природных закономерностей (слабо нарушенный режим). Так, например, под влиянием распашки или застройки территории, вырубки лесов, создания прудов, проведения осушительных мелиораций земель и т. п. могли произойти существенные перераспределения площадей водосбора, понизиться или повыситься уровни грунтовых вод, увеличиться или уменьшиться сезонные амплитуды колебаний уровней подземных вод и даже мог значительно измениться баланс подземных вод (соотношение приходных и расходных его статей). Однако если режимом подземных вод, несмотря на все произошедшие в нем существенные изменения, управляют по-прежнему преимущественно естественные факторы и для прогноза основных параметров режима подземных вод (максимальных, минимальных и средних годовых значений уровней или расходов подземных вод) необходимо знать только их, то такой режим следует относить к слабо нарушенному. В основу прогнозов режима подземных вод при этом могут быть положены лишь связи прогнозируемых элементов или параметров режима подземных вод с природными процессами, действующими в измененных гидрогеологических условиях.

Ко второй группе относится такой режим, формирование которого происходит под существенным воздействием как естественных, так и искусственных факторов и прогнозы которого могут быть составлены только при учете и тех и других. В зависимости от степени влияния естественных или искусственных факторов эту группу можно было бы подразделить на нарушенный и сильно нарушенный режим, но главным здесь остается необходимость одновременного учета и закономерностей формирования естественного режима подземных вод и особенностей хозяйственной деятельности человека. Подобные условия формирования режима подземных вод могут быть встречены на водозаборах, имеющих активную связь с дневной поверхностью и с реками, на осушаемых массивах, на орошаемых территориях, в зоне влияния горнорудных предприятий, водохранилищ и т. д.

К третьей группе относятся территории, режим подземных вод которых формируется только под влиянием искусственных факторов. Воздействие естественных факторов здесь практически отсутствует или их влияние по весовому вкладу несоизмеримо мало по сравнению с искусственными. Поэтому прогноз режима подземных вод в этом случае может осуществляться с учетом только искусственных факторов. Подобные условия могут быть встречены в зонах водозаборов, эксплуатирующих сравнительно глубоко залегающие напорные воды, в прибрежных зонах водохранилищ, особенно в начальный период их заполнения, в отдельных случаях на орошаемых массивах в аридной зоне, в зоне закачек промышленных стоков в глубокие горизонты и т. п.

Опыт составления прогнозов режима подземных вод для территории СССР показал, что для большей части существующей опорной региональной наблюдательной сети для составления вполне достоверных и хорошо оправдывавшихся сезонных прогнозов достаточно учета только серии естествен-

ных факторов (атмосферных осадков, температуры и дефицита влажности воздуха, а также уровней или расходов подземных вод на момент составления прогнозов). Выполненные по этим материалам самые грубые прикидки позволяют отнести к режиму подземных вод первой группы не менее 80% территории СССР, ко второй — 10–15% и к третьей — только единицы процентов.

Подчеркивая особую важность изучения и учета нарушенного режима подземных вод именно на последних, наиболее освоенных и жизненно важных 20% территории, необходимо отдать должное значимости изучения естественного и слабо нарушенного режима подземных вод. Данные о естественном режиме необходимы как для самостоятельного его учета при решении многих практических задач, так и учета закономерностей его формирования как одной из составляющих компонентов во второй группе режима подземных вод, а также как фона, на котором формируется третья группа режима.

Достоверные прогнозы нарушенного режима подземных вод во многих случаях не могут быть составлены без учета естественных факторов, и поэтому в этих случаях они должны строиться путем суммирования двух составляющих, формирующихся под влиянием естественных и техногенных процессов. Оценка степени воздействия хозяйственной деятельности человека на подземные воды и через них на окружающую среду также невозможна без учета закономерностей сезонной и многолетней изменчивости естественного режима подземных вод, без расчленения наблюдаемых в подземных водах изменений на генетические составляющие, обусловленные естественным ходом процессов и искусственными причинами.

Важность оценки и учета при различных гидрогеологических расчетах и прогнозах "естественного фона" настолько очевидна, что, если в будущем доля территорий с нарушенным режимом подземных вод будет резко возрастать, необходимо будет создать специальные гидрогеологические заповедники, на которых сохранится возможность изучения процессов формирования подземных вод под воздействием только природных факторов. Закономерности режима, вскрытые на таких заповедниках, расположенных в типичных гидрогеологических условиях, будут переноситься с ключевых участков на окружающие территории для анализа степени нарушенности режима подземных вод.

В рассматриваемой работе для анализа режима подземных вод отбирались преимущественно ряды наблюдений за уровнями подземных вод, дебитами источников и подземным стоком, характеризующих либо естественным, либо слабо нарушенным режимом, т. е. по территориям и бассейнам, где влияние техногенных факторов явно не проявилось или проявилось, но не в значительной мере. Вместе с тем по ряду районов влияние хозяйственной деятельности, возможно, уже проявилось и отражено в многолетних региональных трендах. Поэтому выявленные по этим районам закономерности многолетней изменчивости режима подземных вод отражают уже суммарный эффект природных и искусственных воздействий. Такие закономерности также представляют значительный практический интерес, так как позволяют оценить естественную и искусственную изменчивость в режиме и ресурсах подземных вод в интегральном виде.

## ИЗУЧЕНИЕ И УЧЕТ МНОГОЛЕТНЕЙ НАПРАВЛЕННОСТИ В РЕЖИМЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ ОЦЕНКАХ ИХ РЕСУРСОВ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗАХ

### СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Вопрос существования определенной многолетней направленности или трендов в режиме подземных вод и, следовательно, определенной направленности изменений ресурсов и запасов подземных вод — один из слабо изученных. На сегодня имеется очень мало опубликованных работ, в которых на массовом фактическом материале рассматривались бы закономерности проявления многолетних трендов в гидрогеологических расчетах и прогнозах [Ковалевский, 1976, 1979]. Теоретическая и практическая важность этого вопроса несомненна. Интересно при этом прежде всего изучение закономерностей формирования подземных вод во времени и пространстве, в том числе выяснение вопроса, является ли питание подземных вод сравнительно постоянным в многолетнем разрезе, или существуют какие-либо четко выраженные тенденции к истощению или накоплению их запасов. Другими словами, осуществляются ли многолетние колебания питания и разгрузки подземных вод во времени относительно какой-то постоянной среднемноголетней величины (нормы), или эти изменения происходят относительно изменяющейся по определенному закону "динамической" нормы (тренда). Если же такие тенденции в изменениях запасов подземных вод существуют, то каковы их масштабы или темпы временной изменчивости? Можно ли ими пренебрегать при палеогидрогеологических реконструкциях и при проведении различных практических гидрогеологических расчетов и прогнозов на обозримую перспективу?

Какова природа этих изменений? Являются ли они следствием только естественных или только искусственных изменений наблюдаемых на Земле процессов, или эти изменения и есть результат интегральных воздействий и первых и вторых? Можно ли в конечном счете управлять этим процессом, предсказывать его и как-то использовать или учитывать при гидрогеологических расчетах и прогнозах?

Исследование этого вопроса, помимо практической значимости, имеет и определенное методическое значение. Так, например, с ним связано теоретическое обоснование применимости используемого гидрогеологами аппарата математической статистики или гармонического анализа для изучения и прогнозов режима подземных вод, применение которого, как известно, возможно лишь при соответствующих допущениях. Такой анализ важен прежде всего для обоснования стационарности и внутрирядной взаимосвязанности гидрогеологических рядов наблюдений за уровнями и расходами подземных вод, а также подземного стока.

Для ответа на поставленные вопросы по всем выбранным для исследования 217 рядам подземного стока и 43 рядам обобщенных региональных характеристик уровней подземных вод были рассчитаны линейные, а для 50 рядов подземного стока также и нелинейные тренды. Были оценены среднегодовые темпы изменчивости выявленных трендов, проанализировано их

региональное распространение (по территории СССР) с учетом различной по знаку направленности и интенсивности изменений в накоплении или истощении запасов подземных вод, подсчитаны средневзвешенные по площади изменения в запасах подземных вод по отдельным крупным регионам страны, по СССР и северному полушарию в целом.

Использованная для анализа колебаний уровней подземных вод форма их выражения в относительных показателях (в процентах обеспеченности) позволила абстрагироваться от частных и аномальных особенностей режима подземных вод по отдельным скважинам и вскрыть типичную для каждого района и даже крупного региона обобщенную тенденцию многолетней изменчивости режима и ресурсов подземных вод. В частности, для составления представлений о многолетней направленности в режиме уровней подземных вод были обобщены данные по 782 специальным наблюдательным опорным скважинам, расположенным на территории СССР и отражающим сравнительно естественный или слабо нарушенный режим. Обобщенные графики были на первом этапе построены для территорий отдельных гидрогеологических станций, расположенных в сравнительно однотипных гидрогеологических условиях и с однотипной направленностью хозяйственной деятельности. На основе этих графиков затем были рассчитаны обобщенные характеристики режима подземных вод по отдельным крупным регионам страны: Европейской части СССР, Западной Сибири, Казахстану и Средней Азии, а также по территории СССР в целом. Следует отметить, что достоверность обобщенных региональных характеристик режима подземных вод во времени неодинакова. До 30-х годов текущего столетия такие графики были построены лишь по единичным рядам наблюдений. При построении подобных графиков для последующих и особенно послевоенных лет был использован уже достаточно массовый материал, что позволяет считать данные за последние 3—4 десятилетия вполне обоснованными.

Линейные тренды устанавливались путем расчета парных корреляционных связей между значениями анализируемого ряда и их порядковыми номерами. Нелинейные тренды подбирались путем сглаживания многолетних колебаний уровней подземных вод или величин подземного стока полиномами низких степеней. Для этой цели обычно рассчитывались и строились кривые полиномов второй—четвертой степени, и в качестве тренда выбиралась та кривая, которая наиболее правдоподобным образом отражает фактически наблюдаемые характерные для данного природного региона тенденции в изменениях уровней подземных вод и подземного стока. Были опробованы также возможности аппроксимации многолетних колебаний уровней подземных вод и подземного стока синусоидальным и экспоненциальным трендами. Результаты выполненного анализа приводятся далее.

#### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКОЙ ЗНАЧИМОСТИ ТРЕНДОВ**

Выполненные массовые расчеты для выявления линейных и нелинейных трендов в многолетних колебаниях уровней подземных вод и подземного стока в большинстве случаев выявили ясные тенденции к положительной или отрицательной направленности в изменении многолетних норм анализировавшихся рядов наблюдений. Вместе с тем расчеты коэффициентов корреляции для выявленных линейных трендов показали весьма существен-

ный разброс их величин. В ряде случаев величины коэффициентов корреляции данных связей оказались настолько малы ( $<0,1-0,2$ ), что о реальности существования каких-либо трендов и даже об их знаке говорить трудно. В других случаях коэффициенты корреляции даже для такой грубой аппроксимации, как выделение линейного тренда на фоне значительных многолетних колебаний подземного стока и уровней подземных вод, довольно высоки ( $>0,3-0,6$ ). Тем не менее для уверенного определения реальности существования трендов и выбора наиболее достоверного критерия их значимости потребовалась специальная оценка степени их статистической достоверности.

Степень достоверности вскрытых трендов оценивалась различными способами: расчетом рангового коэффициента корреляции Спирмена, методом анализа числа скачков и смены знака колебаний [Миллер, Кан, 1965], а также способом, рекомендуемым Всемирной метеорологической организацией (ВМО), изложенным в работе А.А. Коноплянцева, С.М. Семенова [1979].

Ранговый коэффициент Спирмена ( $\rho$ ) рассчитывался по формуле

$$\rho = 1 - \frac{6\sum d_i^2}{N^3 - N}, \quad (3)$$

где  $d_i^2$  — разность между порядковым номером и рангом каждого хронологического значения анализируемого ряда длиной  $N$  членов.

Ранжирование ряда проводится от меньшего значения ряда к большему. Ранговый коэффициент ( $\rho$ ) имеет значения от  $-1$  до  $+1$ . Значения, близкие к  $-1$ , свидетельствуют о наличии отрицательного тренда, а близкие к  $+1$  — о наличии положительного тренда. Значения, близкие к нулю, указывают на отсутствие тренда. Об условном существовании трендов можно говорить при  $\rho > |0,5|$ .

Оценка достоверности существования трендов методом скачков и смены знака заключалась в расчете математического ожидания ( $E$ ), дисперсии ( $V$ ) случайного процесса и вероятности ( $\Phi(z)$ ) случайного или неслучайного появления скачков и смены знака в многолетних колебаниях уровней или расходов подземных вод. При допущении гипотезы о случайном и нормальном расположении элементов изучаемой дихотомической последовательности расчет указанных критериев проводился по формулам

$$E(u) = \frac{2n_1 n_2}{n_1 + n_2} + 1, \quad (4)$$

$$V(u) = \frac{2n_1 n_2 (2n_1 n_2 - n_1 - n_2)}{(n_1 + n_2)^2 (n_1 + n_2 - 1)}, \quad (5)$$

$$Z = \frac{U - E(u)}{\sqrt{V(u)}}, \quad (6)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  — число значений ряда, находящихся соответственно ниже или выше его медианного значения;  $U$  — число скачков группировок последовательных хронологических значений ряда с однопипным по знаку отклонением от его медианы.

Таблица 2

Примеры расчета достоверности тренда разными способами

№ п/п	№ створа	Река	Длина ряда, лет	Коэффициент парной корреляции, r	Темп спада в модулях, л/с·км <sup>2</sup> в год	Z (u)	Z (t)	$\rho$	WMO (Z)	Примечание
1	18	Неман	26	-0,03	-0,008	1,23	0,0	-0,02	-0,21	Тренда нет
2	50	Терек	47	0,03	0,01	-1,31	-0,35	0,13	0,49	То же
3	34	Кубань	47	0,05	0,008	-2,80	-1,76	0,12	0,28	"
4	105	Чикой	22	-0,04	-0,02	-0,83	-0,70	-0,12	-0,52	"
5	10	Утроя	27	-0,11	-0,03	-0,54	1,08	-0,17	-0,70	"
6	57	Кама	40	0,11	0,02	-2,58	0,50	0,10	0,46	"
7	72	Тынь	32	0,13	0,02	0,0	1,29	0,05	0,25	"
8	8	Плюсса	27	0,06	0,02	-0,96	-0,33	0,10	0,36	"
9	26	Ингул	28	0,20	0,02	0,28	-1,09	0,13	0,93	"
10	5	Ена	38	-0,20	-0,02	-0,69	-0,39	-0,07	-1,67	"
11	38	Белая	47	0,20	0,12	-0,43	0,0	0,10	0,79	"
12	54	Ока	87	0,21	0,05	-3,10	-1,70	0,33	3,38	Тенденция к тренду
13	63	Суйфун	34	0,21	0,02	-1,03	-0,95	0,23	1,17	Тренда нет
14	74	Гижига	21	0,31	0,09	1,27	1,13	0,27	1,26	То же
15	12	Пяру	50	0,33	0,09	0,28	1,98	0,36	1,83	Тенденция к тренду
16	53	Волга	85	-0,26	-0,13	-1,75	-0,74	-0,27	-2,04	То же
17	91	Аллах-Юнь	27	0,32	0,005	-2,12	-1,26	0,25	1,32	Тренда нет
18	67	Б. Бира	33	0,30	0,02	-1,95	-1,50	0,24	1,39	То же
19	106	Хиллок	36	0,42	-0,04	-0,05	-2,70	0,50	-3,07	Тренд есть
20	77	Камчатка	21	0,41	0,30	-1,55	-1,98	0,40	1,71	Тенденция к тренду

3. Зак. 322

21	17	Вента	48	0,39	0,13	-0,57	0,47	0,24	1,50	Тренда нет
22	71	Лютога	21	0,41	0,03	-1,10	-1,89	0,34	1,59	Тенденция к тренду
23	119	Тым	35	0,40	0,30	-2,91	-0,41	0,47	2,71	Тренд есть
24	27	Сож	48	0,48	0,03	-1,18	-1,70	0,54	2,82	То же
25	2	Пижма	33	0,50	0,02	-1,24	-0,58	0,47	2,70	"
26	52	Кума	45	0,49	0,02	-3,16	-3,13	0,33	1,84	"
27	96	Ус	21	0,53	0,026	-1,55	-1,98	0,50	2,88	"
28	117	Уса	35	-0,64	-0,71	-0,17	-1,66	-0,27	-1,55	Тенденция к тренду
29	82	Сеймчан	33	-0,65	0,014	-1,28	-3,11	-0,52	-2,70	Тренд есть
30	171	Пенжина	17	-0,56	0,008	-2,74	-0,60	0,70	5,42	Тенденция к тренду
31	170	Анадырь	16	0,61	0,02	-0,55	-1,05	0,55	3,40	Тренд есть
32	9	Сороть	20	-0,68	-0,004	0,46	1,11	-0,03	-0,72	Тренда нет
33	155	Мегра	17	-0,71	0,17	-0,26	0,62	-0,64	-3,42	Тренд есть

## Тренды по обобщенным региональным характеристикам уровней подземных вод

1.	СССР	-0,19	-1,0	Тенденция к тренду
2.	ЕТС	20,24	-1,63	То же
3.	Сибирь и Дальний Восток	0,11	0,046	Тренда нет
4.	Западная Сибирь	-0,17	-0,63	То же
5.	Казахстан и Средняя Азия	0,34	2,40	Тренд есть
6.	ЕТС (без юга)	0,05	0,08	Тренда нет
7.	Юг ЕТС	0,51	2,50	Тренд есть
8.	США	-0,28	-1,41	Тенденция к тренду

Для полученного значения  $Z$  по таблицам нормального распределения находилась соответствующая вероятность ( $\Phi(z)$ ) того, что флуктуации значений в анализируемом ряду случайны. При малых ( $<0,01$ ) значениях  $\Phi(z)$  гипотеза о случайности колебаний отвергалась и признавалось наличие тренда.

Аналогично рассчитывалось и число смены знака колебаний:

$$E(t) = \frac{2N - 4}{3}, \quad (7)$$

$$V(t) = \frac{16N - 29}{90}, \quad (8)$$

$$Z = \frac{t - E(t)}{\sqrt{V(t)}}, \quad (9)$$

где  $N$  — длина ряда наблюдений ( $N = n_1 + n_2$ );  $t$  — число точек перегибов графика колебания, определяющих изменение знака процесса, т. е. точек изменения колебаний с восходящих на нисходящие и наоборот. Остальные обозначения прежние.

На отсутствие тренда или случайное расположение элементов последовательности указывает величина вероятности  $\Phi(z)$ , менее допустимой при 0,025 уровне значимости, т. е. по абсолютной величине менее 1,96. При  $|\Phi(z)| > 1,96$  наличие тренда считается статистически достоверным.

Оценка достоверности существования многолетних тенденций по рекомендуемой ВМО методике проводилась по формулам

$$Z = 3P \sqrt{\frac{n_0}{N + 2,5}}, \quad (10)$$

$$n_0 = \frac{N(N-1)}{4}, \quad (11)$$

$$P = \frac{\sum_{i=1}^{n=1} n_i}{n_0} - 1, \quad (12)$$

где  $n_i$  — число последующих членов ряда, не превышающих по абсолютной величине каждый данный ( $i$ ) член ряда (для рядов по уровням подземных вод, измеренным в глубинах от поверхности земли);  $N$  — длина ряда наблюдений.

Для рядов подземного стока, выраженных в абсолютных значениях расходов,  $n_i$  оценивалось как число предыдущих членов ряда, не превышающих по величине каждый данный ( $i$ ) член ряда.

Наличие тренда определяется также по величинам  $Z > |1,96|$ , т. е. для 0,025 или 0,975 уровня значимости. Следует подчеркнуть, что ни один из всех этих критериев, как и большинство статистических оценок, не имеет строгой границы, определяющей наличие или отсутствие трендов. Все они, как и выбор уровня значимости оценок (97,5; 95 или 90%-ной обеспеченности), весьма условны. Поэтому количественные формы анализа необходимо сочетать с экспертными оценками исходного материала. Формальные коли-

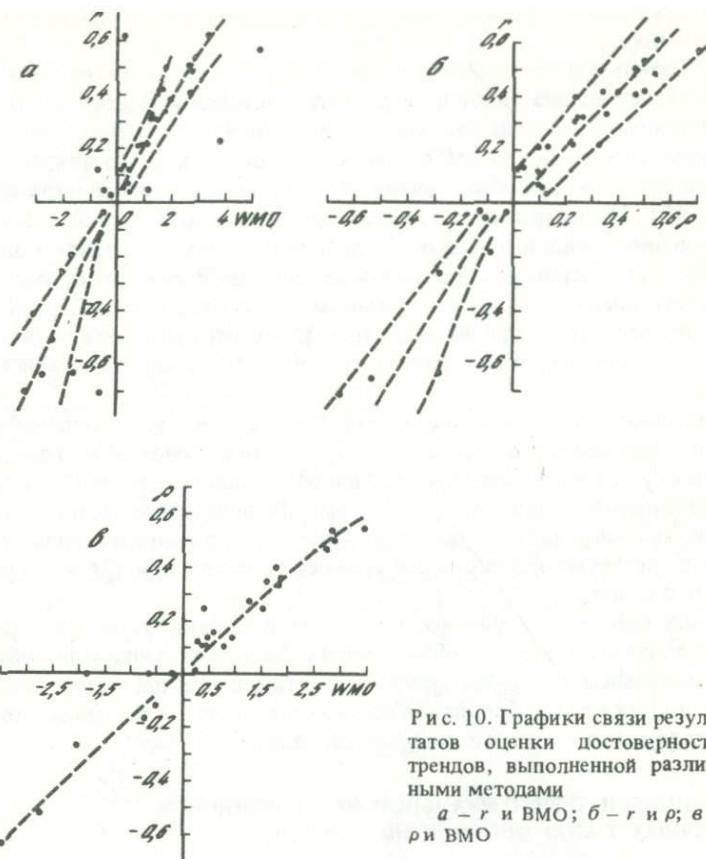


Рис. 10. Графики связи результатов оценки достоверности трендов, выполненной различными методами  
 а -  $r$  и  $WMO$ ; б -  $r$  и  $\rho$ ; в -  $\rho$  и  $WMO$

чественные критерии могут лишь свидетельствовать с большей или меньшей уверенностью о существовании трендов, о наличии тенденций к трендам или их отсутствии.

Анализ достоверности трендов различными методами показал, что о реальном существовании трендов можно достаточно уверенно говорить при коэффициентах корреляции связи  $Q = f(t)$ , превышающих 0,4 (табл. 2), особенно для рядов продолжительностью свыше 30 лет. В ряде случаев явные тенденции к трендам проявляются даже при  $r = 0,2-0,33$ . Более того, можно отметить, что отражающие наличие трендов коэффициенты корреляции связи хронологических значений ряда с их порядковыми номерами далеко не обязательно должны быть высокими. Эта связь позволяет выделить динамическую норму анализируемого процесса и определить знак и темп ее изменчивости во времени. Поэтому в естественных процессах, особенно характеризующихся высокой динамичностью колебаний относительно нормы (т. е. с большими коэффициентами вариаций), коэффициенты корреляции таких связей могут быть очень малыми. Важно, чтобы они были статистически значимыми. Высокие коэффициенты корреляции таких связей скорее свидетельствуют о нарушении процесса, когда его многолетняя нап-

равленность начинает проявляться более четко по сравнению с естественными колебаниями.

Дополнительную уверенность в наличии или отсутствии трендов может дать различный анализ рядов по двум-трем критериям. Достаточно хорошие по сопоставимости результаты оценки достоверности трендов дают критерий Спирмена и методика ВМО. Они, как правило, хорошо увязываются с коэффициентами корреляции связи  $Q = f(t)$  как по величинам, так и по знаку (рис. 10). Поэтому в целях исключения случайности оценку реальности существования трендов лучше всего производить по комплексу критериев ( $r$ ,  $\rho$  и  $Z$ ), по сопоставимости порядка их величин. В качестве примера можно привести оценку тренда в подземном стоке бассейна р. Сорочь. Здесь определено отсутствие тренда даже при достаточно высокой величине  $r = -0,68$ , так как два других критерия,  $\rho = -0,03$  и  $Z = -0,72$ , оказались незначимыми.

Оценки достоверности трендов методом скачков и точек перегиба не дают такой сопоставимости результатов. Знаки этих оценок не всегда соответствуют знаку тренда, и поэтому эти способы анализа не могут быть признаны однозначными и удовлетворительными. Выполненные расчеты и оценки показали, что многолетние тренды действительно во многих случаях (около 40%) существуют как в режиме уровней подземных вод, так и в режиме подземного стока.

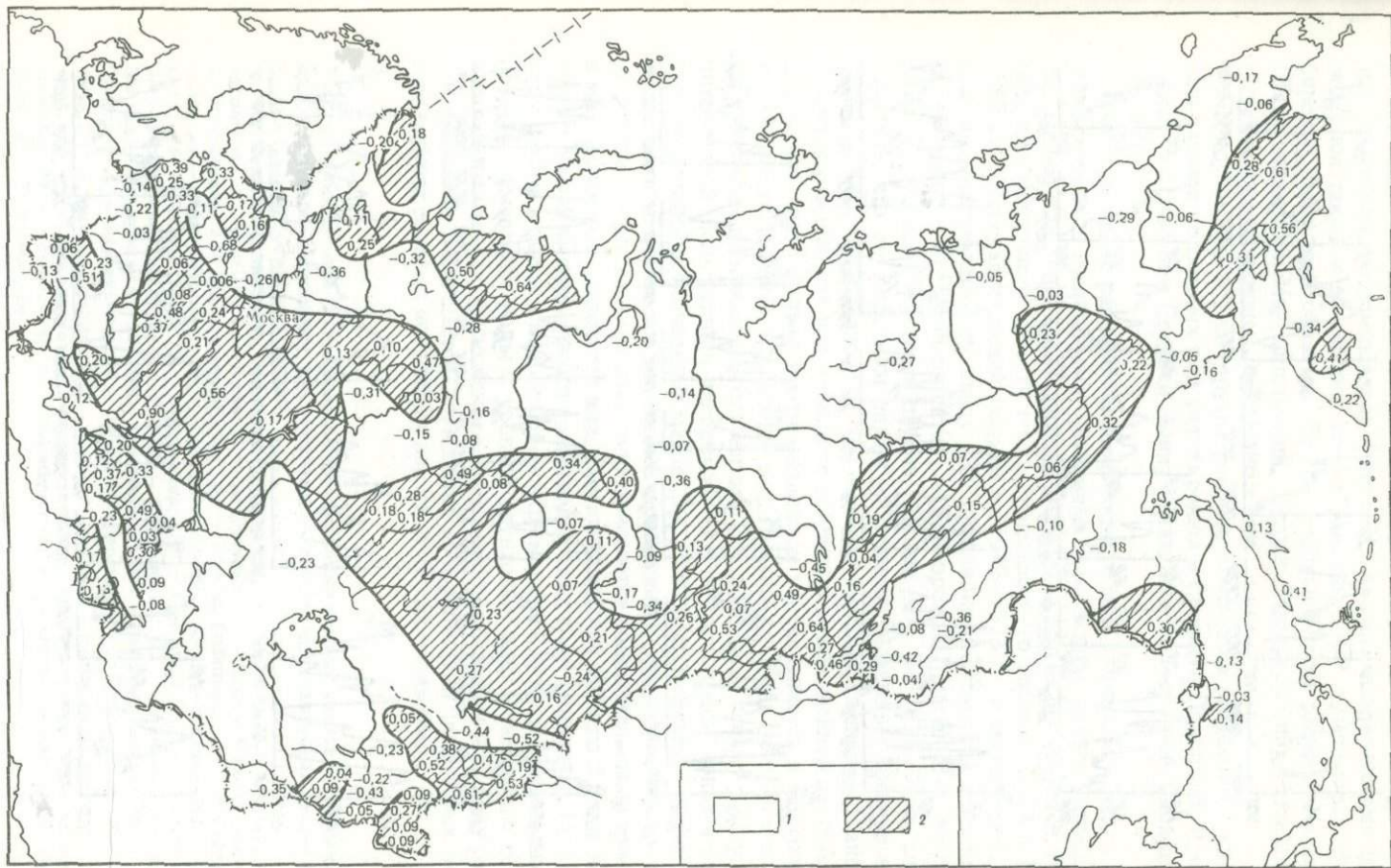
В целях снижения вероятности случайной оценки характера тренда в уровнях подземных вод подобные расчеты были проведены и для обобщенных региональных его характеристик, выраженных в процентах обеспеченности. Они также подтвердили наличие статистически значимых трендов, т. е. достоверность их реального существования.

#### ОСОБЕННОСТИ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ ПРИУРОЧЕННОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ МНОГОЛЕТНИХ ТРЕНДОВ

Особенности территориальной приуроченности различных трендов исследовались как на территории СССР, так и на территории США с использованием данных по уровням подземных вод и по подземному стоку.

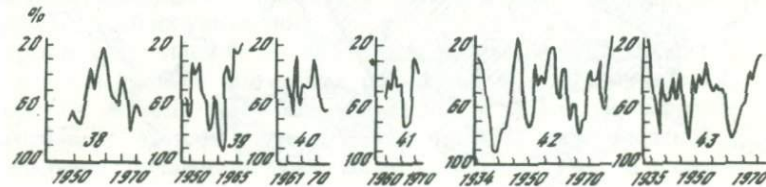
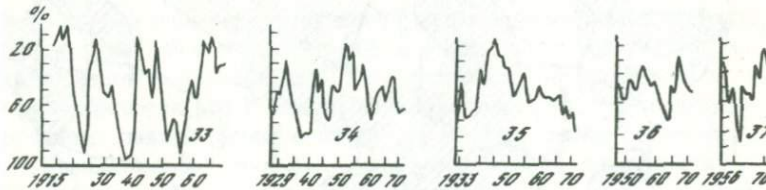
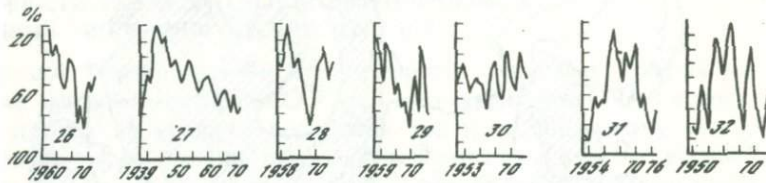
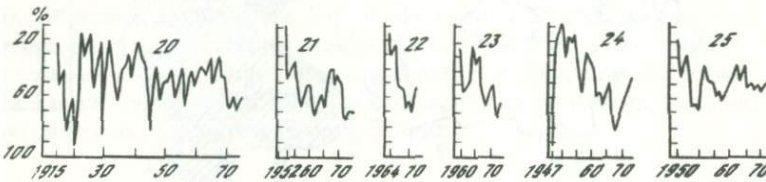
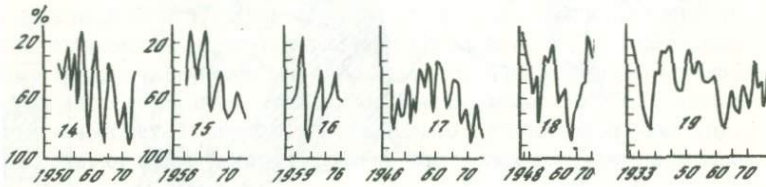
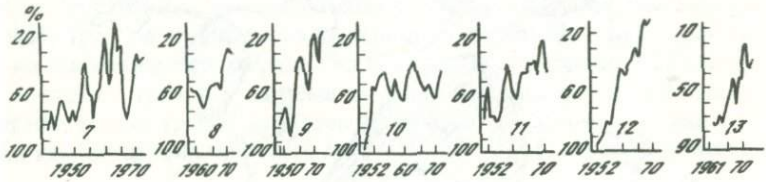
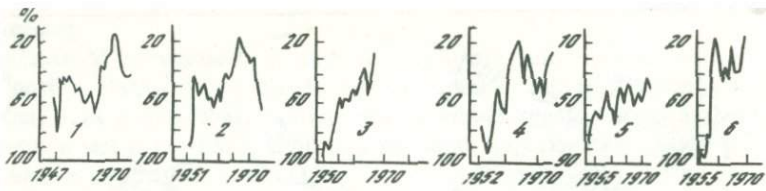
Проведенные исследования многолетних трендов в режиме уровней подземных вод и подземного стока по всей территории СССР установили в большинстве случаев наличие определенной направленности либо к спаду, либо к подъему уровней и соответственно к уменьшению или увеличению во времени расходов подземных вод. Распределение направленности этих тенденций по территории СССР можно иллюстрировать картой коэффициентов корреляции зависимостей величин подземного стока от времени (рис. 11). Отрицательные коэффициенты корреляции свидетельствуют об уменьшении запасов подземных вод и подземного стока за многолетие, а положительные — об их увеличении.

Рассмотрение составленных по отдельным районам СССР обобщенных графиков режима уровней подземных вод также показало значительную неравномерность естественного восполнения и различную направленность изменчивости запасов подземных вод. Так, для Ленинградской области, Прибалтики, Белоруссии и центральных районов РСФСР за последние десятилетия на фоне периодического чередования отдельных группировок



Р и с. 11. Схема распределения коэффициентов корреляции зависимости расходов подземного стока от времени

1 — районы с преимущественным развитием отрицательных трендов; 2 — районы с преимущественным развитием положительных трендов



маловодных и многоводных лет отмечается отчетливая тенденция к истощению запасов подземных вод (рис. 12). Аналогичная тенденция прослеживается также и во многих других районах СССР: в Приморье, Новосибирской и Омской областях, Грузии, большей части районов Казахстана (Карагандинский, Мангышлакский, Западно-Казахстанский, Актюбинский, Алма-Атинский районы), в Фергане и т.д.

Наряду с этим в ряде других районов отмечается тенденция к увеличению запасов подземных вод (юг Украины и Среднего Поволжья, Предкавказья, ряд районов Средней Азии, Казахстана и Восточной Сибири; см. рис. 12).

Имеются также районы, где, возможно, в силу короткости рядов или в соответствии с природными условиями каких-либо явных тенденций к истощению или пополнению запасов подземных вод не проявляется. Например, для Иркутской области после существенного спада уровней в 1957—1962 гг. наблюдался общий подъем до 1970—1973 гг. с амплитудой, близкой предшествовавшему спаду. Не проявились какие-либо тенденции в Челябинской и Томской областях, в Криворожье, Прикарпатье, Азербайджане, Туркмении, Бухаре и других районах (см. рис. 12). Здесь следует отметить, что по коротким рядам наблюдений выделение трендов невозможно и нецелесообразно, так как они могут оказаться чисто случайными. Имеются районы, где под влиянием различной хозяйственной деятельности отмечается диаметрально противоположная направленность в многолетней изменчивости уровней подземных вод. Проявляются они преимущественно по различным водоносным горизонтам. Так, в Степном Крыму в результате интенсивной эксплуатации напорных вод в целях водоснабжения и орошения, принявшей региональные масштабы, наблюдается систематическое снижение пьезометрических уровней. В прибрежных районах полуострова отрицательные тренды в уровнях сопровождаются положительными трендами в минерализации подземных вод, увеличивающейся с 0,9 до 5,5 г/л за последние 30 лет за счет подсоса соленых морских вод [Кошулько, 1981]. Наряду с этим в зонах влияния Северо-Крымского канала и орошаемых территорий отмечается подъем уровней грунтовых вод. В последние годы в центральных частях Московского артезианского бассейна и по ряду равнин Азербайджана наблюдается повышение минерализации подземных вод за счет подсоса соленых подземных вод из глубоких горизонтов.

Рис. 12. Обобщенные региональные характеристики режима уровней подземных вод в процентах обеспеченности для территорий деятельности различных гидрогеологических станций (режимных партий)

1 — Северо-Украинская; 2 — Южно-Украинская; 3 — Крымская (степная); 4 — Саратовская; 5 — Северо-Кавказская; 6 — Дагестанская; 7 — Северо-Казахстанская; 8 — Кустанайская; 9 — Кашкадарьинская; 10 — Курган-Тюбинская; 11 — Кайраккумская; 12 — Муонкумская; 13 — Минусинская; 14 — Северо-Западная; 15 — Эстонская; 16 — Латвийская; 17 — Литовская; 18 — Белорусская; 19 — Московская; 20 — Крымская (южнобережная); 21 — Грузинская; 22 — Мангышлакская; 23 — Западно-Казахстанская; 24 — Карагандинская; 25 — Алма-Атинская; 26 — Актюбинская; 27 — Ферганская; 28 — Западно-Сибирская; 29 — Приморская; 30 — Львовская; 31 — Нижневолжская; 32 — Башкирская; 33 — Каменная Степь; 34 — Бухарская; 35 — Узбекская; 36 — Азербайджанская; 37 — Иркутская; 38 — Теджен-Мургабская; 39 — Армянская; 40 — Челябинская; 41 — Оренбургская; 42 — Горьковская; 43 — Туркменская

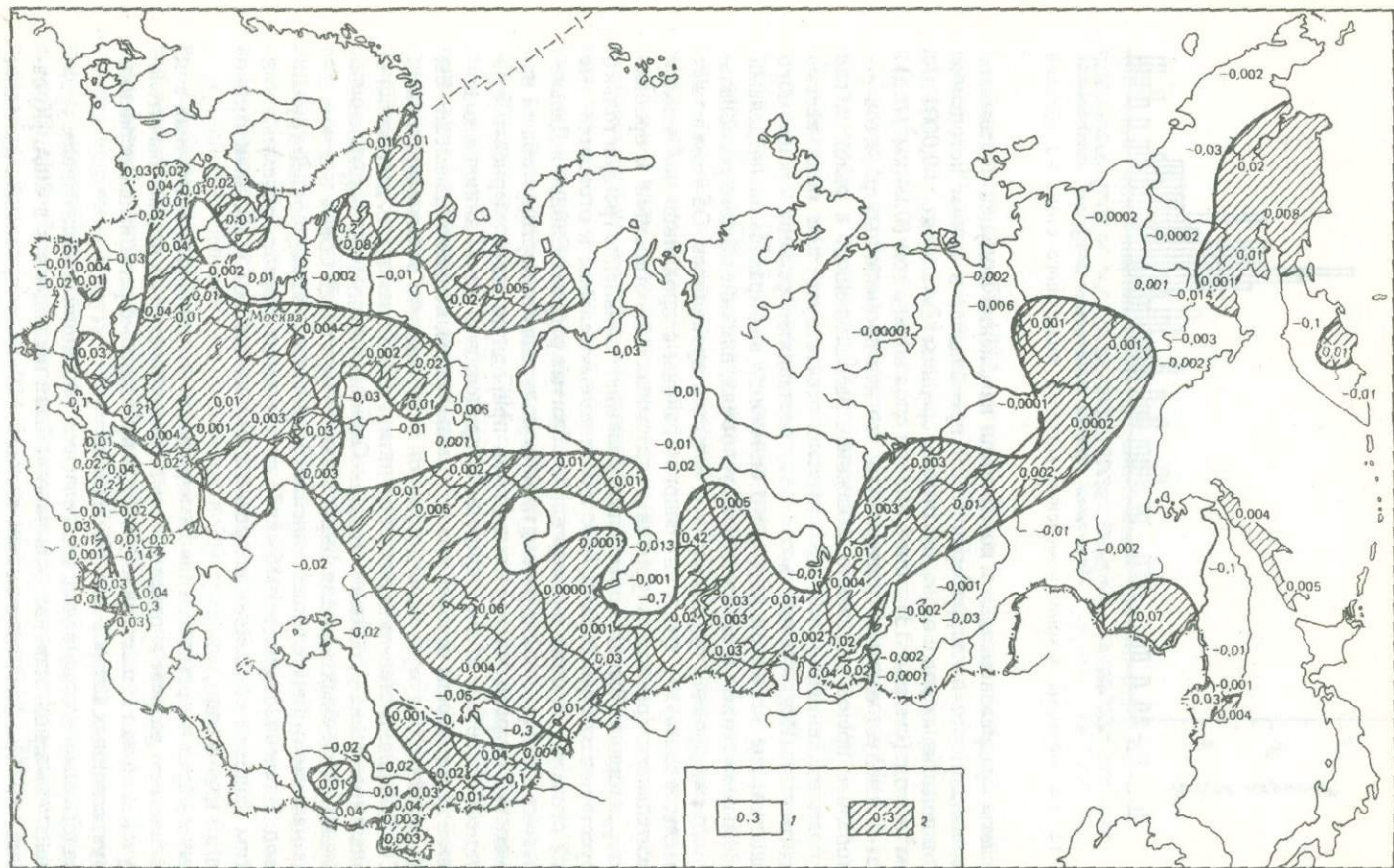
На сильно урбанизированных территориях различные по знаку тренды отмечаются даже в пределах одного — первого от поверхности водоносного горизонта. Примером может служить территория Москвы. Поэтому оценку истинной региональной тенденции в многолетнем режиме подземных вод можно произвести либо выбрав для этого районы и скважины с естественным или слабо нарушенным режимом, либо, если это невозможно, оценивать суммарный эффект вскрытых разнонаправленных тенденций в балансе подземных вод в целом с выделением площадей с различными трендами и расчетом соотношения интенсивности многолетней изменчивости уровней или ресурсов подземных вод в их пределах. Подобная оценка может быть выполнена как по каждому региону в отдельности, так и по СССР и даже по отдельным континентам в целом.

Конфигурация площадей с положительными и отрицательными трендами по территории СССР, выделенными по знакам коэффициентов корреляции, как видно из рис. 11, очень сложная, и дать этим контурам какое-то определенное гидрогеологическое обоснование весьма трудно. Наиболее отчетливы как положительные, так и отрицательные тренды в Средней Азии, на юге Казахстана, на юге Восточной Сибири, на крайнем Северо-Востоке СССР и на севере Европейской части Союза. Для территории Средней Азии и Казахстана в целом, за исключением орошаемых территорий, также была характерна тенденция к общему снижению уровня подземных вод с 1929 до 1946–1947 гг., после чего наметилась некоторая тенденция к его подъему (см. рис. 12).

#### РЕГИОНАЛЬНАЯ И ГЛОБАЛЬНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ, ЕЕ ОБУСЛОВЛИВАЮЩИЕ

Особый интерес в рассматриваемой проблеме представляет обоснование генетических предпосылок, определяющих реальную временную изменчивость в ресурсах подземных вод. При этом, помимо оценок статистической достоверности трендов подземного стока, немаловажной представляется также оценка практической значимости вскрываемых трендов, т. е. обоснование необходимости их учета в гидрогеологических расчетах. Для этой цели рассчитывались темпы или градиенты линейных трендов, выражаемых в изменениях модулей подземного стока в единицу времени, т. е. в литрах в секунду с квадратного километра в год. В результате таких расчетов было установлено, что средние за многолетие направленные изменения модулей подземного стока варьируют в значительных пределах от  $\pm 0,00001$  до  $\pm 0,71$  л/с · км<sup>2</sup> в год, т. е. от практически незначимых до весьма существенных, учет которых может быть важным.

Результаты этих расчетов приведены на карте (рис. 13). Как видно из данной карты, темпы изменений модулей подземных вод, выраженных в метрах кубических в секунду с квадратного километра в год, в разных районах весьма различны, и закономерности этих изменений в региональном плане улавливаются с трудом. В среднем без учета знака абсолютный темп изменений модулей составил  $0,032$  л/с · км<sup>2</sup> в год. Преобладающими значениями положительных трендов, как видно из гистограммы (рис. 14), являются  $0,005$ – $0,04$ , а для отрицательных —  $0,005$ – $0,015$  л/с · км<sup>2</sup> в год (см. рис. 14).



Р и с. 13. Темпы среднемноголетнего увеличения или снижения расходов подземного стока в модулях ( $n/c \cdot \text{км}^2$  в год)

1 – районы с преимущественным развитием отрицательных трендов; 2 – районы с преимущественным развитием положительных трендов

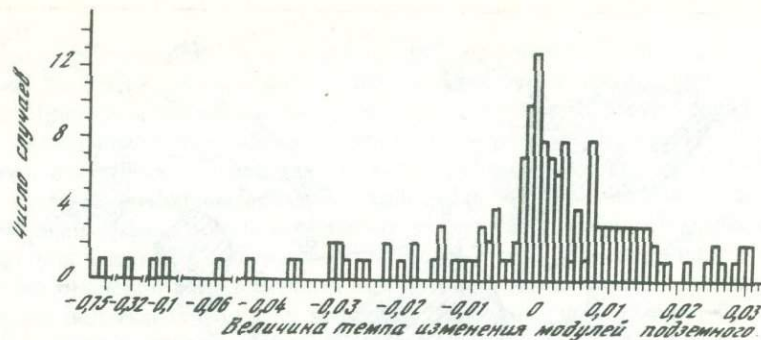
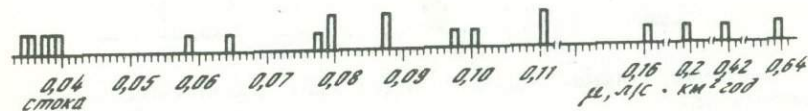


Рис. 14. Гистограмма темпов изменения модулей подземного стока во времени

Расчеты средневзвешенного по площади изменения модулей подземных вод показали, что на территории СССР преобладает в целом истощение запасов подземных вод с очень небольшим средним темпом около  $0,0001 \text{ л/с}$  с  $1 \text{ км}^2$  в год (см. рис. 13), или  $0,002 \text{ мм}$  слоя воды в год ( $0,04 \text{ км}^3/\text{год}$ ). При этом следует еще раз подчеркнуть, что для проделанных расчетов использовались преимущественно скважины, расположенные в районах, где антропогенное влияние или практически отсутствует, или пока весьма незначительно. Исключение, возможно, составляют районы орошаемого земледелия, где несмотря на то, что скважины выбирались за пределами орошаемых массивов в естественных условиях, влияние общего регионального подъема уровней грунтовых вод все-таки проявилось. Об этом может свидетельствовать тот факт, что многие районы с проявившимся четким положительным трендом в уровнях подземных вод относятся к орошаемым территориям. Вместе с тем нельзя увязывать появление трендов только с искусственными факторами, так как и положительные и отрицательные тренды существуют даже в самых слабо обжитых районах Сибири и Дальнего Востока. Это позволяет рассматривать полученную картину общей изменчивости ресурсов подземных вод как природную закономерность, вызванную естественным ходом природных процессов. Учет же влияния хозяйственной деятельности человека на подземные воды, возможно, изменил бы общий характер полученной региональной изменчивости режима подземных вод СССР. Однако степень и даже результирующий знак таких изменений в региональном плане установить трудно. Оценка многолетней направленности режима подземных вод для Европейской территории Союза в целом показала наличие отрицательного линейного тренда в режиме уровней грунтовых вод. В течение периода 1915–1976 гг. снижение запасов подземных вод по этим данным составило в среднем около  $0,6 \text{ мм}$  в год или около  $0,02 \text{ л/с} \cdot \text{км}^2$  в год.

Таким образом, региональная изменчивость восполнения подземных вод в многолетнем разрезе в отдельных регионах может быть весьма значительна и учет ее может существенно уточнить проводимые региональные оценки эксплуатационных запасов подземных вод.

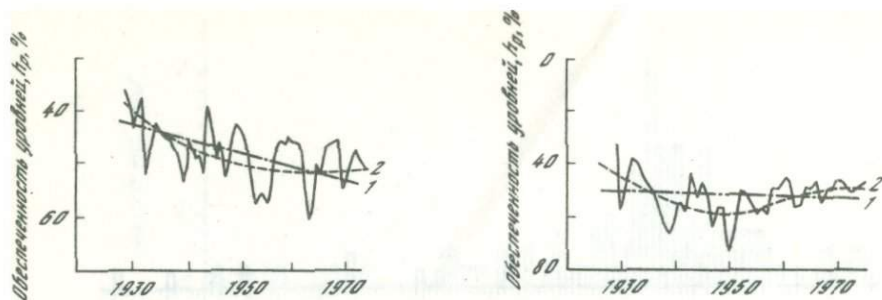
Аналогичные исследования многолетних тенденций в колебаниях уровней подземных вод, как уже отмечалось, были проведены и в США [Ковалевский, 1976]. Анализировались данные 129 наблюдательных скважин



Геологической службы США, которые были тщательно отобраны приблизительно из 20 тыс. существующих скважин. Выбирались скважины, имеющие длительный период наблюдения, сравнительно равномерно расположенные по территории и находящиеся в условиях, наиболее близких к естественным.

Анализ многолетних изменений уровней подземных вод в США показал, что за период в среднем с 30-х годов нашего столетия по 1970–1976 гг. на 60 скважинах наблюдалась явная тенденция к спаду уровней, на 34 – к их подъему. По 35 скважинам многолетняя тенденция была выражена недостаточно четко. Обобщение различных тенденций в уровнях подземных вод на территории США показало, что средний спад уровней составил  $0,16 \text{ м}$  в год, а средний темп подъема уровней –  $0,03 \text{ м}$  в год. Определение разности между объемом подземных вод, стекающих с рассматриваемой территории, и объемом воды, пополняющей запасы подземных вод, с учетом площадей распространения районов с различными тенденциями в процессе восполнения запасов подземных вод показало преобладание многолетнего истощения запасов подземных вод со средней скоростью около  $0,1 \text{ м}$  в год. С учетом средней водоотдачи пород, принятой равной  $0,1$ , за период в последние 35–40 лет подземные воды США сокращались в среднем на  $10 \text{ мм}$  слоя воды в год, или  $0,31 \text{ л/с} \cdot \text{км}^2$  в год, что составляет  $\approx 78 \text{ км}^3$  в год. Такое интенсивное снижение запасов подземных вод США в значительной степени связано с высоким темпом роста их эксплуатации (рис. 15). Если учесть дополнительно те районы США, где воздействие человека на подземные водные ресурсы наиболее интенсивно, то можно ожидать, что темпы их снижения в целом могут быть существенно больше. Намечившаяся, судя по нелинейному тренду, тенденция к стабилизации уровней подземных вод в США связана, по-видимому, с принятием в последние годы мер по упорядочению водоотбора и искусственному восполнению запасов подземных вод.

Воздействие человека на подземные воды приводит, как известно, с одной стороны, к дополнительному подпитыванию подземных водных ресурсов за счет утечек из водопровода и канализационной сети, орошения земель поверхностными водами, фильтрации поверхностных вод из искусственных водоемов и других гидротехнических сооружений, создания лесных полос, искусственного восполнения запасов подземных вод и т. п. С другой стороны, воздействие человека связано с дополнительным расходом подземных вод. Это связано с откачками подземных вод для водоснабже-



Р и с. 15. Обобщенные изменения уровня грунтовых вод в процентах обеспеченности для территории США

1 – линейный тренд; 2 – нелинейный тренд

Р и с. 16. Обобщенные изменения уровня грунтовых вод в процентах обеспеченности для северного полушария

1 – линейный тренд; 2 – нелинейный тренд

ния, искусственным дренажем заболоченных и переувлажненных земель, осушением горных выработок, городских территорий и т. д. Оба эти процесса могут наблюдаться сейчас практически в любом освоенном районе. Однако в гумидных областях преобладают тенденции к искусственному понижению уровней подземных вод, а в аридных, наоборот, к повышению уровней.

Помимо территории США и ряда районов СССР, интенсивное воздействие человека на подземные воды наиболее характерно для Европы, где суммарное водопотребление с начала столетия увеличилось в 8 раз и составило к 1975 г. около  $380 \text{ км}^3$  в год, или почти 18% поверхностного стока. Причем более половины этого водопотребления приходится на промышленность и около 1/3 на нужды сельского хозяйства [Ермолина, Клиге, 1979]. В целом для Западной Европы, вероятно, можно принять характер изменения запасов подземных вод (в плане их сокращения), близкий к США.

Учитывая характер изменения уровня грунтовых вод на достаточно хорошо исследованной территории, которая составляет около  $33,2 \text{ млн. км}^2$ , базируясь на приведенных данных, Р.К. Клиге рассчитал обобщающее изменение уровня грунтовых вод в процентах обеспеченности для основной территории континентов с общей площадью около  $134,8 \text{ млн. км}^2$  (рис. 16). Эти расчеты показали, что с начала века (но более достоверно в период 1929–1950 гг.) довольно резко снижался уровень грунтовых вод, особенно в 1930, 1936–1939, 1947 и 1950 гг. Начиная с 1951 г. наметилась тенденция к подъему уровней. В целом за этот период на суше уровень грунтовых вод снижался со средней скоростью около 0,8 мм слоя воды в год, что должно было приводить к ежегодному сокращению запасов подземных вод почти на  $108 \text{ км}^3$ . Данный процесс хорошо увязывается с отмеченным в эти же годы истощением других составляющих вод суши (рек, замкнутых озер, ледников) и увеличением запасов воды в океане [Клиге, 1979]. При этом вклад подземных вод в увеличение объема океана, уровень которого поднимается со скоростью около 1 мм в год, в данном столетии достигает 20%.

Многолетние тенденции в режиме уровней подземных вод и подземного стока отдельных крупных регионов отражают прежде всего изменчивость

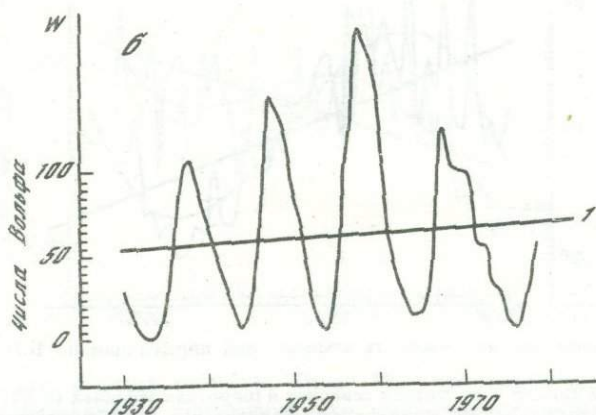
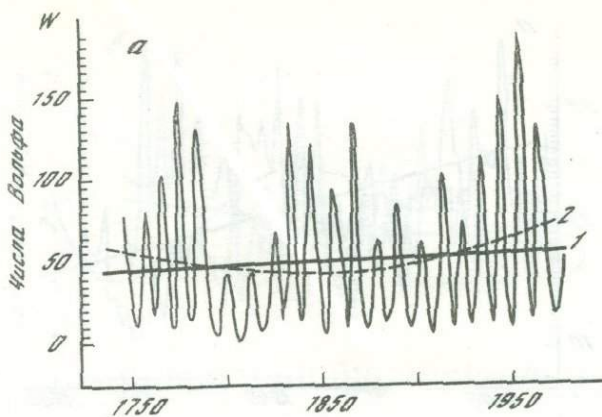


Рис. 17. Характер многолетней направленности в режиме солнечной активности, выраженной в числах Вольфа ( $W$ ) за весь период наблюдений ( $a$ ) и за последние десятилетия ( $b$ )

1 — линейный тренд; 2 — нелинейный тренд

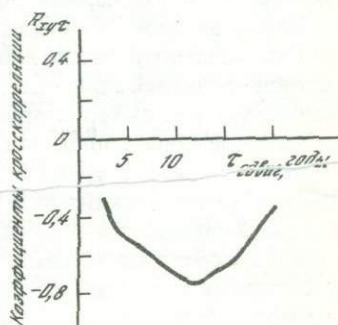


Рис. 18. Взаимная автокорреляционная функция среднегодового изменения уровня подземных вод и температуры воздуха северного полушария [Клиге, 1979]

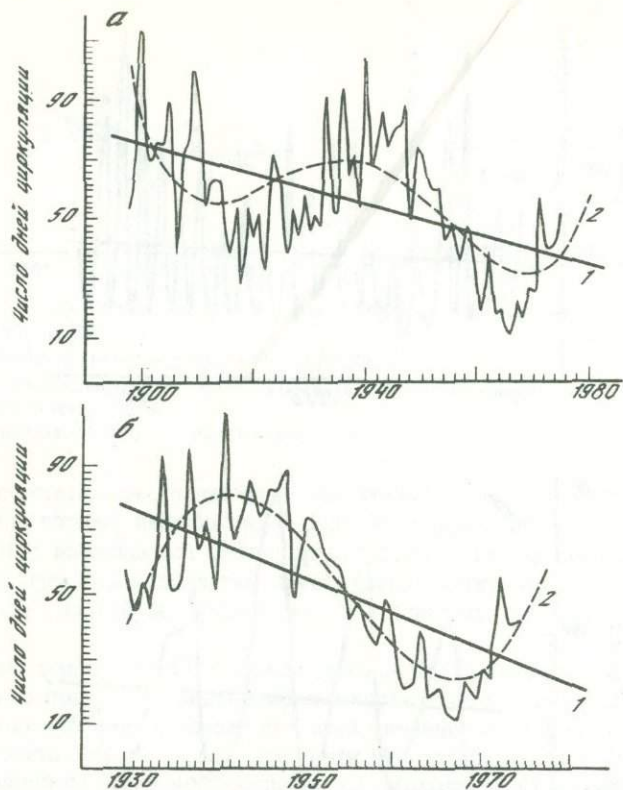
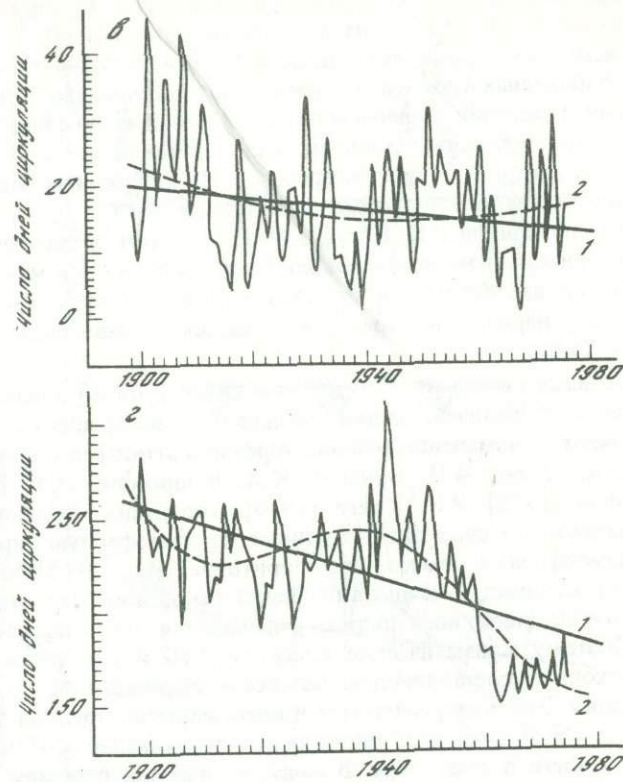


Рис. 19. Многолетняя изменчивость атмосферной циркуляции по Б.Л. Дзержевскому

Европейский сектор — долготная северная и широтная западная (а, б); Сибирский сектор — долготная северная и широтная западная (в); Дальневосточный сектор — широтная западная и долготная южная (г); 1 — линейный тренд; 2 — нелинейный тренд

водного режима наиболее крупного масштаба, определяющегося преимущественно изменением процессов глобального водообмена, тесно связанных с многолетними колебаниями климатических условий. В то же время в них отражается и суммарный эффект хозяйственной деятельности человека.

Первопричиной появления многолетних трендов в режиме подземных вод, по-видимому, нужно считать изменения солнечной активности. Распределение площадей с положительными и отрицательными трендами в режиме подземных вод на территории СССР в целом довольно близко соответствует распределению площадей с положительными и отрицательными корреляционными связями уровней подземных вод и подземного стока с числами Вольфа [Ковалевский, 1976]. И положительные тренды, и прямые связи режима подземных вод с солнечной активностью тяготеют в целом к средним широтам, а также развиты отдельными участками по югу страны, приуроченными к горным районам. Общая глобальная тенденция к истощению запасов подземных вод также хорошо увязывается с общим ростом солнеч-



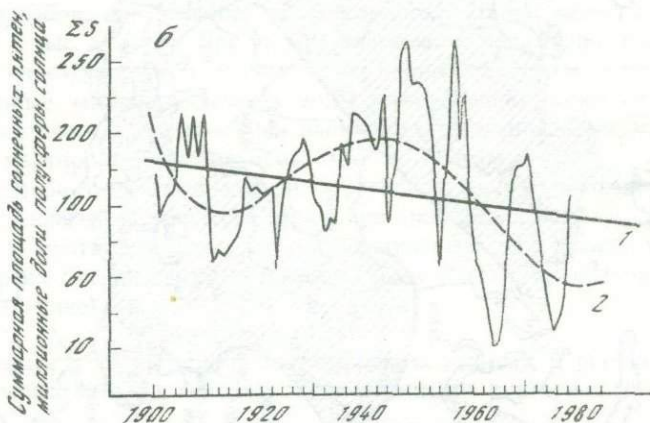
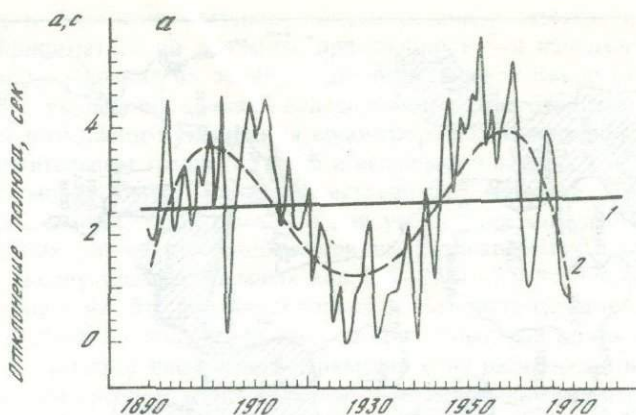
ной активности в этом столетии (рис. 17), что сопоставляется многими исследователями с отмечающимися климатическими изменениями [Рубинштейн, Полозова, 1966; Будыко, 1977]. В частности, установлено, что с конца прошлого века началось заметное потепление климата (почти на  $1^{\circ}\text{C}$ ), которое достигло максимума в 30–40-е годы нашего столетия. Затем наблюдалось некоторое снижение температуры до середины 60-х годов, которое сменилось опять ее повышением. По данным М.И. Будыко [1977], рост температуры за последние 12 лет составил около  $0,3^{\circ}\text{C}$ . Амплитуда температурных изменений в высоких широтах была значительно больше, чем в низких, что приводило к существенному изменению среднего меридионального градиента температур. Расчеты М.И. Будыко и К.Я. Винникова [1973] показывают, что повышение температуры воздуха в северном полушарии на  $0,1^{\circ}\text{C}$  приводит к относительному уменьшению меридионального градиента на 0,5% для среднегодовых условий. Эти особенности климатических изменений в свою очередь привели к изменению испарения, характера атмосферной циркуляции и режима атмосферных осадков на континентах, что не могло не сказаться на изменении режима подземных вод. Для выяснения связи обобщенных уровней подземных вод и среднегодовой температуры воздуха Р.К. Клиге была рассчитана взаимная корреляционная функция среднегодовых изменений уровней подземных вод и тем-

пературы воздуха (рис. 18), которая позволила выявить наибольшую степень их связанности с коэффициентом корреляции порядка 0,75 при сдвиге в 12 лет между этими характеристиками. Это свидетельствует о том, что изменения обобщенных уровней подземных вод запаздывают относительно температурных изменений в среднем на 12 лет, что связано с определенным периодом инерции влияния изменения климатических условий на режим подземных вод, который в свою очередь связан со средним периодом их миграции в зоне активного водообмена в земной коре.

Эти расчеты позволили Р.К. Клиге [1979] получить достаточно определенную связь годовых изменений обобщенных уровней подземных вод для территории суши в зависимости от среднегодовой температуры воздуха северного полушария, которая выражается уравнением  $(h_p \%) = 132,26 \Delta t_{\text{сп}}^0 - 21,85$ .

Это уравнение свидетельствует о наличии связи уровней подземных вод преимущественно с увеличением или уменьшением испарения с поверхности суши в результате изменений теплового режима атмосферы. Однако, как показали исследования М.И. Будыко, К.Я. Винникова, О.А. Дроздова, Н.А. Ефремовой [1978], Р.К. Клиге [1979], колебания меридионального градиента температуры существенно влияют на атмосферную циркуляцию и на режим атмосферных осадков над территорией суши. В результате чего при потеплении количество осадков на значительной части территории континентов, особенно умеренных широт, уменьшается, а при похолодании — возрастает. Поэтому климатические температурные изменения влияют не только на расходную составляющую баланса подземных вод, но и на размеры их питания. Это подтверждается и идентичностью трендов в режиме подземных вод и в атмосферной циркуляции, отражающей особенности переноса тепла и влаги в атмосфере. В качестве примера приведем характеристики трендов по двум типам атмосферной циркуляции Б.Л. Дзердзеевского для различных секторов страны (широтной западной и долготной южной, а также долготной северной и широтной западной), с которыми, как показали наши предыдущие исследования, чаще всего встречаются наиболее тесные корреляционные связи режима уровней подземных вод и подземного стока [Ковалевский, 1976]. Как видно из рис. 19, а, б, в, в данных типах атмосферной циркуляции во всех случаях отмечается общая линейная, по видимому многовековая, направленность в сторону некоторого затухания колебаний этих типов циркуляции, на фоне которой отмечаются близкие к вековым, возможно периодические, колебания этих процессов. При этом интересно отметить, что характер линейных трендов, т. е. общая глобальная направленность первого порядка, и в этих типах атмосферной циркуляции, и в солнечной активности, и в режиме подземных вод одинаков. Характер же нелинейных трендов в различных регионах страны в зависимости от имеющей место асинхронности режима подземных вод может быть как прямым, так и обратным.

Близкие по характеру нелинейные тренды отмечаются в режиме подземных вод, отклонениях полюсов вращения Земли от географического, а также в суммарных площадях солнечных пятен (рис. 20). В них вскрываются тенденции к 50–60-летней цикличности при аппроксимации многолетних колебаний полиномами четвертой степени. Все это свидетельствует не о случайной, а о генетически обусловленной причине, формирующей как

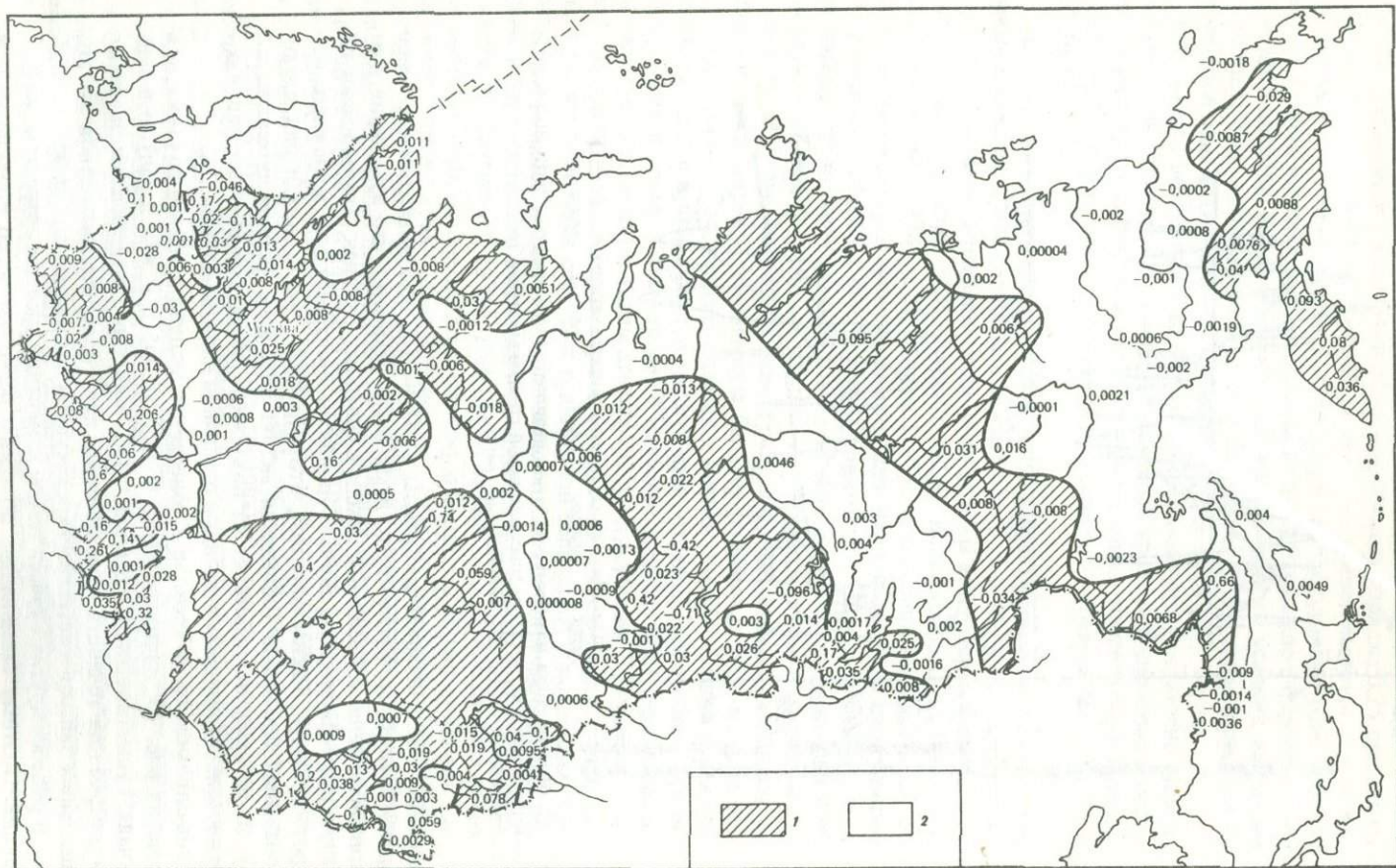


Р и с. 20. Многолетняя изменчивость отклонений полюса вращения Земли от географического полюса (а) и суммарных площадей солнечных пятен (б)

1 — линейный тренд; 2 — нелинейный тренд

линейные, так и нелинейные тренды в различных, но взаимосвязанных природных процессах. Кроме того, нами было отмечено, что изменения в отклонениях полюса вращения Земли в северных районах страны имеют обратную, корреляционную связь с уровнями грунтовых вод, а в южных, наоборот, прямую. Таким образом, этот процесс, так же как и ряд других глобальных процессов (солнечная активность, атмосферная циркуляция и др), по-разному воздействует на подземные воды в различных районах и также может приводить к трендам различной направленности.

Значительная часть трендов в колебаниях модуля подземного стока, как видно из рис. 13, ничтожно мала (менее  $\pm 0,005$  л/с · км<sup>2</sup> в год), и в этих случаях существованием трендов, даже если они статистически значимы, без ущерба для точности практических гидрогеологических оценок эксплуатационных запасов и естественных ресурсов подземных вод можно пренебречь. В ряде же других случаев темпы изменений трендов возрастают на 1–2 порядка. Поэтому выявленные по таким регионам четко проявляющиеся



Р и с. 21. Карта районов, в пределах которых учет многолетних трендов в гидрогеологических расчетах целесообразен  
 1 – темпы изменений подземного стока существенные, (л/с · км<sup>2</sup> в год); 2 – темпы незначительные

тенденции к изменению питания подземных вод в многолетнем разрезе должны приниматься во внимание при планировании использования подземных вод и оценках их эксплуатационных запасов как с точки зрения возможного ухудшения условий водоснабжения (при отрицательном тренде), так и возможного увеличения водоотбора подземных вод в будущем (при положительном тренде). Ущерб и выигрыш в запасах подземных вод при этом может быть весьма существенным, несмотря, казалось бы, небольшие размеры темпа снижения или увеличения модулей подземного стока. В таких оценках необходимо принимать во внимание и длительность периодов эксплуатации подземных вод (25—27 лет) и величины площадей воронок депрессий. Это позволяет только за счет учета трендов значительно уточнить возможные изменения запасов подземных вод во времени, которые могут оказаться иногда соизмеримыми с их расчетными величинами. Например, при среднем темпе увеличения модулей подземного стока, равном всего 0,04 л/с·км<sup>2</sup> в год, за расчетный период в 25 лет производительность водозабора при воронке депрессии около 20 км<sup>2</sup> может возрасти до 20 л/с (1,7 тыс. м<sup>3</sup>/сут). При вполне возможном увеличении темпов трендов на порядок, а также при увеличении площади воронки депрессии эксплуатационные запасы подземных вод соответственно также возрастут. В целях практического приложения данных исследований нами произведена попытка картирования территории СССР по темпам многолетней изменчивости подземного стока с выделением регионов, где учет многолетних трендов целесообразен и нецелесообразен при проведении гидрогеологических расчетов и прогнозов (рис. 21). Существенным для практики условно принят тренд с изменением его темпа свыше 0,005 л/с·км<sup>2</sup>/год (по абсолютной величине).

#### ВОЗМОЖНОСТИ ДОЛГОСРОЧНЫХ ПРОГНОЗОВ РЕЖИМА И РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ОСНОВЕ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ ВСКРЫТЫХ ТРЕНДОВ

Особого рассмотрения требует вопрос об экстраполяции вскрытых трендов в будущем. В основу такой экстраполяции должен быть положен генетический подход, т. е. выявление возможных причин, обуславливающих появление тренда, и логический анализ возможного развития процессов в будущем. Формальная экстраполяция трендов по установленным на известном отрезке наблюдений уравнениям (как для линейных, так и нелинейных трендов) недопустима и может привести к абсолютно нереальным результатам. Так, например, экстраполяция нелинейных трендов полиномами различных степеней, вполне удовлетворительно аппроксимирующими колебания уровней подземных вод и подземного стока на фактически наблюдавшемся отрезке ряда, дает весьма различные тенденции будущих изменений, которые могут оказаться даже противоположной направленности (рис. 22). В приведенных примерах (см. рис. 22) в качестве наиболее вероятных были выбраны тренды, описываемые соответственно полиномами четвертой и третьей степеней, которые затем и учитывались (вычитались) для последующего проведения спектрального анализа рядов, чем достигалось приведение рядов к стационарным. Однако для обоснования экстраполяции этих или каких-либо других трендов необходим дополнительный материал, так как (см. рис. 22) экстраполяция полиномиальных трендов, как правило, не может дать удовлетворительных результатов.

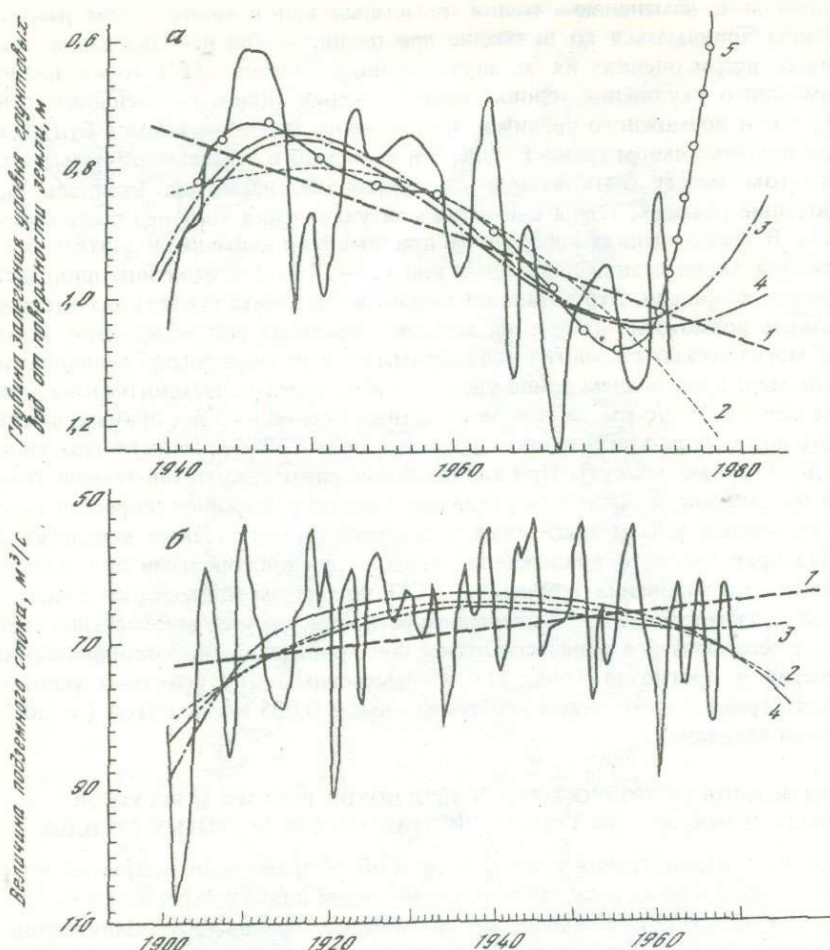


Рис. 22. График колебаний уровня грунтовых вод по скв. 459/2 Горьковской станции (а) и подземного стока в бассейне реки Чирчик (б) и осредняющие их линейный (1) и нелинейные (2–5) тренды

Цифры у кривых указывают степень аппроксимирующего полинома

При обосновании выбора наиболее вероятного типа тренда целесообразным представляется следующий порядок анализа.

1. Установление и оценка возможного преобладания естественных или искусственных причин, формирующих тренд в каждом конкретном районе и бассейне. Эта задача решается на основе сопоставления характера многолетней изменчивости режима подземных вод каждого участка или бассейна (выраженной в процентах обеспеченности) с обобщенной региональной характеристикой режима подземных вод, составленной также в процентах обеспеченности для какой-то территории в целом. Методика подобного расчленения естественного и нарушенного режима подземных вод рассмотрена нами ранее [Ковалевский, 1976].

2. При формировании трендов под влиянием естественных факторов наиболее вероятными многолетними крупномасштабными колебаниями, имеющими глобальный характер, должны быть циклические, обусловленные либо сравнительно закономерными планетарными или космическими процессами, либо менее закономерными, но также периодическими чисто земными процессами. Среди космогенных факторов можно отметить изменения вращения Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца, приливные силы планет и Луны, вращение Солнечной системы в Галактике, различные пульсационные механизмы. Среди чисто земных процессов можно отметить автоколебательные процессы, обусловленные выравниванием градиентов тепла, а следовательно, и влаги между экватором и полюсами, а также между океаном и сушей.

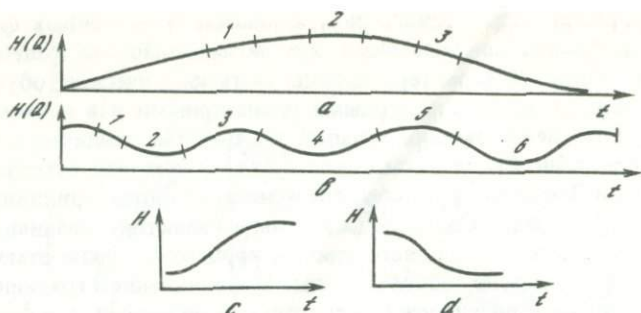
Анализ многочисленных земных процессов (метеорологических, гидрогеологических, гидрологических и др.) показал [Шнитников, 1969; Максимов, 1971; и др.] существование циклов как близких к вековым (60–100 лет), так и многовековых (1800 лет и более продолжительных). Поэтому имеющиеся сравнительно короткие (20–80 лет) наблюдения за режимом подземных вод теоретически могут оказаться, принимая во внимание различную степень инерционности водоносных горизонтов, на различных отрезках этих глобальных циклов или трендов (рис. 23):

а) на отрезках подъема, спада или перегибов многовекового цикла, много большего по своему периоду колебаний по сравнению с продолжительностью наших наблюдений и поэтому отраженного в этих наблюдениях трендом, близким к прямолинейному (рис. 23, *a*);

б) на различных отрезках векового цикла или на большей его части (рис. 23, *b*). В этом случае характер тренда в зависимости от продолжительности анализируемого ряда наблюдений может оказаться весьма разнообразным от прямолинейного (1, *b*) до положительного или отрицательного гиперболического (2, 3, *b*), положительного или отрицательного параболического (4, 5, *b*) или даже близкого к синусоидальному (6, *b*). Как видно из приведенной схемы, экстраполяция трендов, вскрытых по коротким рядам, не может достаточно обоснованно отразить характер процесса в будущем. Истинную картину возможных колебаний в этом случае может дать лишь синусоидальный тренд:

в) на отрезках многовекового и векового циклов одновременно. Экстраполяция в этом случае возможна как линейного, так и синусоидального векового тренда.

3. При формировании режима подземных вод под влиянием искусственных факторов чаще, как показывают многочисленные наблюдения, встречаются тренды, имеющие экспоненциальный или логарифмический характер, особенно в зоне активного водообмена (см. рис. 23 *c*, *d*). Связано это со свойством природных процессов к саморегулированию или компенсации искусственно вызванных нарушений. Так, при интенсивном водоотборе в отдельных случаях увеличивается питание подземных вод на эксплуатируемом участке за счет снижения испарения и увеличения площадей водосбора (за счет развития воронки депрессии), а также роста роли привлекаемых запасов в формировании эксплуатационных запасов за счет перетекания из смежных водоносных горизонтов или подтока речных вод. Все это направлено на компенсацию водоотбора и определяет тенденции к стабили-



Р и с. 23. Схема возможного характера трендов в режиме подземных вод  
 $H$  – уровни;  $Q$  – расходы;  $a, b$  – синусоидальные тренды;  $c, d$  – экспоненциальные тренды; 1–6 – отрезки наблюдавшихся колебаний

зации уровней подземных вод, т.е. к уравниванию приходных и расходных статей баланса водоносного горизонта (см. рис. 23,  $d$ ). При подпоре подземных вод водохранилищами и каналами, наличии утечек из водопроводных и канализационных сетей, а также при орошении увеличение приходных статей баланса и связанный с этим подъем уровней подземных вод компенсируется резким увеличением их расходования на испарение и транспирацию при достижении капиллярной каймы поверхности земли, а также увеличением оттока подземных вод к дренам. Это также определяет тенденцию к стабилизации уровней, которые как бы срезаются (ограничиваются) поверхностью земли (см. рис. 23,  $b$ ).

Вырубка леса, распашка земель, асфальтирование, застройка и планировка территорий, осуществление дренажных мелиораций и тому подобное также на первом этапе существенно искажают сформировавшийся ранее режим подземных вод. Однако через какой-то промежуток времени вызванные этими воздействиями направленные изменения (тенденции) постепенно стабилизируются и стремятся уже к какой-то новой многолетней норме. Поэтому наиболее вероятными трендами в условиях нарушенного режима подземных вод оказываются экспоненциальные. Отклонения от этих тенденций могут определяться лишь прогрессивно возрастающей ролью искусственных воздействий по сравнению с природными факторами.

Таким образом, в условиях естественного и слабонарушенного режима подземных вод обоснованной экстраполяции поддается лишь линейный тренд, а при убедительной тенденции к вековому циклу – соответствующий синусоидальный тренд. В условиях же нарушенного режима целесообразна экстраполяция лишь экспоненциальных трендов.

Вопросы о возможной продолжительности экстраполяции тех или иных трендов и степени нарушенности режима подземных вод также неоднозначны. Так, например, экстраполяция интенсивных линейных трендов на достаточно отдаленную перспективу, если допустить их обусловленность только естественными причинами, может в отдельных случаях привести к практическому исключению подземного питания рек, снижению уровней ниже подошвы водоносных горизонтов или выше поверхности земли, т.е. дать абсолютно нереальные результаты. Поэтому для оценки степени нарушенности режима подземных вод необходимо первоначально определить характер и интенсивность тенденций естественного фона, а затем сопоставить

его в относительных показателях с анализируемым рядом. Пересчитав относительные (в процентах обеспеченности) изменения уровней или расходов подземных вод в абсолютные величины, можно при наличии несоответствий анализируемого ряда с региональной обобщенной характеристикой режима оценить долю вклада хозяйственной деятельности в наблюдаемые колебания уровней подземных вод или подземного стока. При значительной доле искусственных изменений экстраполироваться должен не линейный, а экспоненциальный или логарифмический тренд.

Опыт показывает, что экстраполяция линейных и экспоненциальных трендов возможна в ряде случаев до 10 и более лет. При этом, чем менее интенсивен темп изменений трендов, тем большая заблаговременность его экстраполяции возможна, особенно для линейных трендов, так как тем меньшую роль в их формировании играют искусственные факторы и тем больше они соответствуют схеме (см. рис. 20, а).

Учет многолетних трендов целесообразен и при рассмотрении перспектив водообеспечения отдельных регионов и страны в целом. Приближенные оценки тенденций возможных изменений в ресурсах подземных вод могут быть сделаны по обобщенным региональным характеристикам режима подземных вод.

При экстраполяции нелинейных трендов важно установление генетических причин их формирующих, и выявление временных сдвигов в проявлениях того или иного фактора или процесса на режим подземных вод. Наиболее достоверной может быть экстраполяция в пределах выявленного времени запаздывания. Значительно менее достоверной, но все-таки в какой-то мере принципиально верной может быть экстраполяция таких трендов по закономерности, вскрытой на отрезке предыдущих наблюдений. Такой подход может более реально отразить характер исследуемого процесса в будущем, чем чисто вероятностная его оценка, т.е. расчет среднесуточной нормы и дисперсии возможных колебаний.

Подобные экстраполяции линейных трендов могут служить основой и для предварительного решения различных практических проблем, связанных с изменчивостью ресурсов подземных вод. Так, например, опираясь на представленные графики (см. рис. 15, 16) и высказанные генетические предпосылки, можно заключить о существовании двух природных крупномасштабных тенденций в изменениях ресурсов и запасов подземных вод. Одна из них, наиболее общая, представляет собой звено многовекового цикла, намного превышающего по длине своего периода продолжительность инструментальных наблюдений за режимом подземных вод. На фоне этого цикла отмечается общая линейная тенденция к истощению запасов подземных вод на территории СССР и суши в целом. В рамках этого тренда отражен и суммарный эффект хозяйственной деятельности людей на подземные воды.

Другая тенденция второго порядка представляет собой изменения в пределах цикла, близкого к вековому. На фоне этого, также естественно, цикла в 50-х годах настоящего столетия закончился период истощения запасов и начался период их накопления. Последняя тенденция, возможно, свидетельствует о некотором общем похолодании климата, что трудно улавливается по метеоданным (в результате чего по данному вопросу существуют различные точки зрения), но отражается в запасах подземных

вод как в интегральной характеристике изменений наиболее инерционной части водных ресурсов на Земле.

Принимая во внимание обе существующие тенденции в изменениях запасов подземных вод, можно предположить, что в течение двух-трех предстоящих десятилетий запасы подземных вод будут несколько расти или находиться на уровне, близком к современному. После же этого последует их постепенное уменьшение и до размеров, уже существенно меньших, чем отмечались в самые маловодные 30–40-е годы нашего столетия. Несмотря на низкую достоверность такого прогноза, не учитывать такой перспективы нельзя. Ее следует принимать во внимание как при составлении долгосрочных прогнозов, так и при планировании водохозяйственных мероприятий на отдаленную перспективу.

Изменения в запасах подземных вод в отдельные годы на фоне этих общих тенденций могут быть весьма значительными. Так, на основе сопоставления многолетних трендов уровней подземных вод, выраженных в процентах обеспеченностей, и подземного стока можно принять, что изменение тренда уровней всего на 0,15% их обеспеченности приводит к изменению тренда подземного стока на 0,3 мм/год с единицы площади территории СССР. Учитывая то, что размах обобщенных нормированных колебаний ресурсов подземных вод достигает 50% обеспеченности, эти изменения могут достичь значительных объемов, сопоставимых для больших территорий с оцениваемыми на сегодня прогнозными эксплуатационными запасами подземных вод. Все это требует оценки и, если необходимо, учета многолетних трендов при определении и планировании использования ресурсов подземных вод на перспективу.

Выявление трендов может быть важным и при изучении влияния хозяйственной деятельности (оросительных, осушительных мелиораций, урбанизации территории и т.д.) на отмечающиеся изменения гидрогеологической обстановки.

### Глава 3

## **АНАЛИЗ РЕАЛЬНОСТИ СУЩЕСТВОВАНИЯ МНОГОЛЕТНЕЙ ЦИКЛИЧНОСТИ В КОЛЕБАНИЯХ УРОВНЕЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И ПОДЗЕМНОГО СТОКА И ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НА ЭТОЙ ОСНОВЕ**

### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ**

Изучение цикличности в колебаниях уровней и расходов подземных вод непосредственно связано с обоснованием условий эксплуатации подземных вод. Анализу цикличности в режиме уровней подземных вод посвящена серия работ многочисленных исследователей (Г.Ф. Басов, Н.С. Токарев, Н.А. Кенесарин, Д.М. Кац, В.А. Коробейников, А.А. Коноплянцев, В.С. Ковалевский, С.М. Семенов, Ю.Б. Челидзе, Э.А. Зальцберг, Д. Сакалаускене, М.А. Шинкаревский, Г.И. Сачек и др.). Исследования цикличности подзем-

ного стока проводили Б.М. Доброумов, Г.М. Великина, И.С. Зекцер, В.С. Ковалевский и др. Большинство авторов стремились обосновать наличие цикличности в режиме подземных вод и вскрыть причины, ее обуславливающие. При этом, как правило, особенно в самых первых работах, делались попытки вскрыть 11-летнюю цикличность, увязываемую с аналогичной цикличностью в числах Вольфа солнечной активности. Выводы о наличии цикличности делались чаще всего по ограниченному числу наблюдательных точек (и даже по одиночным рядам), основываясь нередко лишь на визуальном или, в лучшем случае, на примитивном периодограммном анализе изучаемых рядов. Каких-либо количественных оценок достоверности данной цикличности, ее вклада в общую дисперсию процесса и достаточности для составления гидрогеологических прогнозов не делалось. Вместе с тем, все исследования такого рода нацеливались на обоснование возможностей долгосрочного и сверхдолгосрочного (многолетнего) прогнозирования режима подземных вод. Более того, на базе экстраполяции такой цикличности делались попытки составления прогнозов режима уровней подземных вод и обосновывания гидрогеологических расчетов при оценках ресурсов и запасов подземных вод. В частности, при расчетах эксплуатационных запасов по ряду месторождений подземных вод Казахстана сработку емкостей водоносных горизонтов планировали в различных случаях на 5 и 9 лет, считая их равными соответствующей периодичности многолетнего восполнения запасов подземных вод. Подобные оценки носили прикидочный характер без необходимого вероятностного анализа достоверности выбранных продолжительностей периодов маловодных лет, и поэтому точность таких оценок, естественно, невелика.

Выполненные в последние годы исследования цикличности в режиме уровней подземных вод и подземного стока показали, что данное явление далеко не так закономерно, как это хотелось бы, и необходимо для составления достоверных гидрогеологических прогнозов и расчетов, как это стремились показать некоторые авторы. Все это вызвало если не скептическое отношение к данному явлению, то по крайней мере большую осторожность в его использовании в гидрогеологической практике. И действительно, режим подземных вод формируется далеко не только под влиянием серии космогенных факторов, характеризующихся сравнительной ритмичностью своих воздействий на Землю в целом и подземные воды в частности, но и большим числом чисто земных процессов. Ведущую роль в формировании режима и ресурсов подземных вод играет режим выпадения атмосферных осадков и испарение, а также косвенно и режим поверхностных водотоков и водоемов, которые, за исключением приливно-отливных эффектов, не имеют закономерной цикличности, а определяются в значительной мере чисто случайным сочетанием различных процессов, протекающих в условиях взаимодействия системы океан—суша—атмосфера, и поэтому не прогнозируются на отдаленную перспективу. Вместе с тем фильтрация атмосферных осадков, просочившихся в водоносные горизонты, осуществляется в них очень медленно (от нескольких сантиметров до нескольких десятков сантиметров в сутки), что в достаточно протяженных (по потоку) водоносных горизонтах приводит к смещению (интегрированию) атмосферных осадков за ряд лет и даже десятки лет. Это и определяет тот факт, что корреляционные связи уровней подземных вод с атмосферными

осадками устанавливаются лучше, когда последние представляются для корреляции в интегральной за ряд лет форме [Ковалевский, 1976]. Такая интегрирующая роль подземных водоносных систем или их инерционности обуславливают повышенную взаимосвязанность уровней и расходов подземных вод соседних лет, что и приводит как бы к группированию лет повышенной и пониженной относительно многолетней нормы водности или к квазициклическости.

В результате в режиме уровней подземных вод и подземного стока весьма редки случаи, когда близкие к многолетнему минимуму их значения сменяются значениями, близкими к многолетнему максимуму, что вполне возможно в атмосферных осадках и режиме речного стока. Все такие переходы в подземных водах осуществляются сравнительно плавно в течение ряда лет, что, кстати, открывает возможность более полного использования подземных вод для покрытия дефицитов в воде в периоды засух. Поэтому исследования закономерностей чередования и процессов формирования таких группировок лет различной водности имеют практическое значение. В частности, учет неравномерности питания во времени открывает определенные перспективы в оптимизации использования запасов подземных вод, так как, например, при наличии сравнительно закономерных изменений величин ресурсов подземных вод и достаточной емкости водоносных горизонтов можно было бы при планировании их эксплуатации ориентироваться на среднюю многолетнюю величину питания или на какую-то другую, более высокую обеспеченность восполнения запасов подземных вод, при которой после определенной маловодной серии обязательно последует многоводная, по объемам и продолжительности превышающая маловодную. В этом случае представляется возможность, срабатывая емкости водоносных горизонтов в маловодный период, гарантировать компенсацию сработанных запасов подземных вод в последующий многоводный период. Поэтому важно доказать: 1) существует ли закономерная циклическость в питании и, следовательно, в режиме уровней подземных вод и подземного стока вообще или нет? 2) Насколько данная циклическость существенна, т.е. как велик вклад циклической составляющей в общий размах многолетних колебаний уровней подземных вод и подземного стока, и поэтому насколько надежным и целесообразным может быть использование данного природного явления для гидрогеологических прогнозов и расчетов? 3) Являются ли выявленные закономерности в многолетней изменчивости уровней и расходов подземных вод сугубо локальными, присущими каждому водноносному горизонту в отдельности, или они характерны для крупных регионов и, следовательно, в какой мере данные о циклическости, полученные по отдельным водопунктам одних территорий, могут экстраполироваться на другие территории, сходные в гидрогеологическом и климатическом отношениях?

Для ответа на все эти вопросы по всем выбранным рядам подземного стока была просчитана циклическость автокорреляционным и спектральным методами и проведен анализ полученных результатов в региональном плане. Здесь следует еще раз подчеркнуть, что основное внимание при разработке настоящего вопроса было уделено анализу данных по подземному стоку, поскольку исследование многолетнего режима уровней подземных вод достаточно подробно были рассмотрены нами ранее. В частности, основные результаты этого анализа были опубликованы в на-

ших работах [Ковалевский, 1974, 1976]. Поэтому, как нам представлялось, на данном этапе требовалось дополнить или подтвердить полученные ранее результаты новыми материалами о подземном стоке, отражающем в более явном виде изменчивость ресурсов подземных вод.

Анализ цикличности осуществлялся по временным рядам, из которых была вычтена трендовая составляющая. Таким путем условно достигалась и создавалась основа для последующего гармонического анализа рядов. Другие признаки стационарности в силу относительной короткости рядов и поэтому некорректности достоверной их оценки не проверялись и не учитывались.

Программа для анализа временных рядов была составлена А.К. Чихачевым для расчетов на ЭЦВМ БЭСМ-6 на языке АЛГОЛ-ГДР. Она включала:

#### 1. Построение интегральных кривых

$$S_k = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x}), \quad (13)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N_x} \sum_{k=1}^{N_x} x_k, \quad (14)$$

где  $\bar{x}$  — среднее значение временного ряда;  $x_i$  — значения временного ряда. Такие кривые служили основой для выяснения низкочастотных многолетних колебаний подземного стока.

#### 2. Нормирование и центрирование временного ряда

$$Z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma_x}, \quad (15)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N_x - 1} \sum_{k=1}^{N_x} (x_k - \bar{x})^2}, \quad (16)$$

где  $\sigma_x$  — среднеквадратическое отклонение ряда.

#### 3. Преобразование Фурье для исходного ряда длиной $N$ членов

$$x_i = \sum_{k=0}^{N/2} \left( A_k \cos \frac{2\pi k}{N} i + B_k \sin \frac{2\pi k}{N} i \right), \quad (17)$$

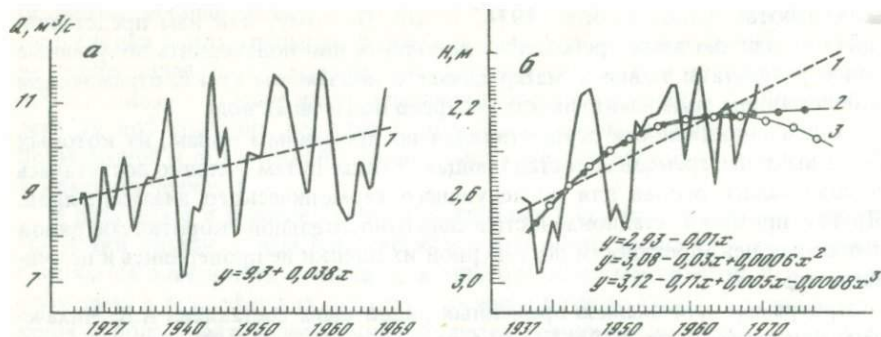
$$x_i = \sum_{k=0}^{N/2} C_k \cos \left( \frac{2\pi k}{N} i + \varphi_k \right), \quad (18)$$

где  $A_k$  и  $B_k$  — коэффициенты Фурье;  $k$  — номер гармоники,  $i$  — порядковый номер точки;  $C_k$  — амплитуды различных гармоник;  $\varphi_k$  — фазы гармоник на начальный момент времени;  $N$  — длина ряда, но не превосходящая  $N_x$ , где  $N_x = 2^m$ ,  $m$  — целое.

#### 4. Расчет корреляционной функции ряда

$$R_i = \frac{1}{N-i} \sum_{i=1}^{N-i} Z_k Z_{k+1}, \quad (19)$$

где  $Z_i$  — центрированные и нормированные значения  $x_i$ .



Р и с. 24. Многолетние колебания подземного стока и уровней подземных вод, аппроксимированные линейным трендом (1), а также полиномами второго (2) и третьего (3) порядка

а – минимальный подземный сток р. Исфайрамсай; б – уровни подземных вод по Горьковской скв. 458

### 5. Расчет спектральной плотности $S_x$ :

$$S_x = \sum_{k=0}^N D_k \cos \frac{2\pi k}{N} i, \quad (20)$$

где  $D_k$  – значения спектральной плотности.

Сглаживание спектральной плотности производилось по методу скользящих средних по двум точкам [Бендат, Пирсол, 1971].

### 6. Расчет доверительных интервалов для корреляционной функции

$$DI_i = \frac{k_{st}}{\sqrt{N-1-i}}, \quad (21)$$

где  $k_{st}$  – коэффициент Стьюдента для 95%-ного уровня значимости.

Параллельно с данными расчетами по каждому временному ряду для сопоставления с датчиков снимались некоррелированные случайные величины, по которым также рассчитывались корреляционная функция и спектральная плотность. Результаты расчетов представлялись в виде графиков, построенных при помощи графопостроителя (рис 24). Результаты выполненных по данной программе расчетов, а также проведенных ранее исследований излагаются далее.

### ВНУТРИЯДНАЯ ВЗАИМОСВЯЗАННОСТЬ И ЦИКЛИЧНОСТЬ В РЯДАХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Степень инерционности или взаимосвязанности членов ряда для подземного стока оказалась намного ниже инерционности уровней подземных вод, оцениваемой по наблюдательным скважинам. Так, размах колебаний коэффициентов автокорреляции при сдвиге  $\tau = 1$  год по различным рядам подземного стока оказался довольно большим (от 0,04 до 0,93), но при среднем значении всего  $R_{\tau=1} = 0,25$ , что мало отличается от характера взаимосвязанности рядов поверхностного стока, для которых  $R_{\tau}$  составляет

Таблица 3

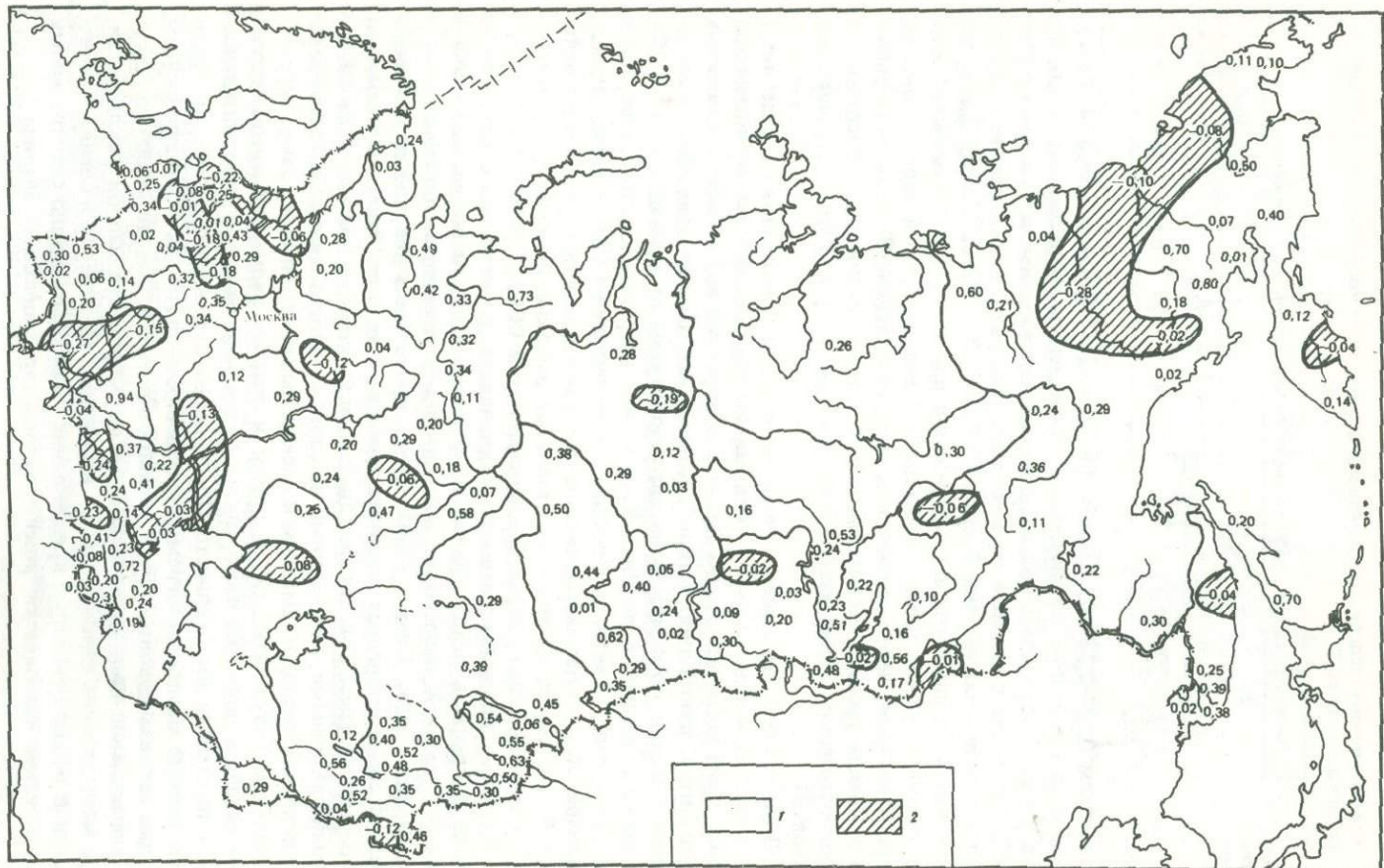
Характеристика степени внутрирядной связанности рядов наблюдений за режимом подземного стока, %

Количество рядов	Коэффициенты автокорреляции ( $R_\tau$ ) при сдвиге								
	$\tau = 1$ год			$\tau = 2$ года			$\tau = 3$ года		
	> 0,8	0,6–0,8	0,4–0,6	> 0,8	0,6–0,8	0,4–0,6	> 0,8	0,6–0,8	0,4–0,6
144	1,38	3,77	13,88	—	2,08	8,33	0,69	0,69	3,47

в среднем 0,18–0,22 (по данным Евджевича, С.Н. Крицкого, Д.Я. Ратковича и др.). Средние же значения коэффициентов автокорреляции для рядов уровней грунтовых вод составляют, как уже отмечалось нами ранее, 0,57, т.е. в два с лишним раза больше, хотя размах этих значений для отдельных рядов также очень большой (0,01–0,97). Здесь следует еще отметить, что коэффициенты автокорреляции при  $\tau = 1$  для подземного стока не только в целом малы по абсолютной величине, но и нередко бывают отрицательными, чего не отмечалось при автокорреляции рядов наблюдений за режимом уровней подземных вод. Число же сравнительно высоких для прогностических целей значений  $R_\tau$  при сдвигах в 1–3 года незначительно (табл. 3).

В связи с тем, что степень инерционности подземного стока определяется не только климатическими условиями, но прежде всего фильтрационными свойствами водовмещающих пород и скоростями водообмена водоносных горизонтов, какой-либо четкой закономерности в региональном распределении величин коэффициентов автокорреляции не отмечалось (рис. 25). И высокие и низкие значения  $R_{\tau=1}$  можно встретить как на севере, так и на юге страны. Также разбросаны по территории СССР и отрицательные значения  $R_{\tau=1}$ . Отмечается лишь некоторая тенденция к увеличению величин  $R_{\tau=1}$  с севера на юг, хотя отдельные высокие значения  $R_{\tau=1}$  до 0,6–0,73 отмечены и на Крайнем Севере территории СССР.

Изучение продолжительности цикличности в колебаниях подземного стока вскрыло в целом аналогичную картину, что и по данным анализа режима уровней подземных вод для зоны активного водообмена [Ковалевский, 1976; Сачок, 1980]. Здесь также была вскрыта практически полная серия различных по длине циклов — от 2 до 19 лет с отдельными перерывами (рис. 26). Анализ цикличности одного и того же ряда наблюдений различными, но близкими по своей сущности методами (автокорреляционным, периодограммным и спектральным анализами) давал нередко различные результаты, т.е. в одном и том же ряду разными методами вскрывались довольно часто циклы, отличающиеся и по продолжительности, и по степени достоверности. Последнее отразилось в том, что суммирующие данный анализ гистограммы цикличности подземного стока по разным видам анализа довольно существенно отличаются. Все это свидетельствует о значительной доле случайности и в формировании данной цикличности, и в методических оценках при их выделении. Поэтому для оценки цикличности в подземном стоке предпочтение нами было отдано спектральному анализу, как наиболее совершенному виду гармонического анализа.

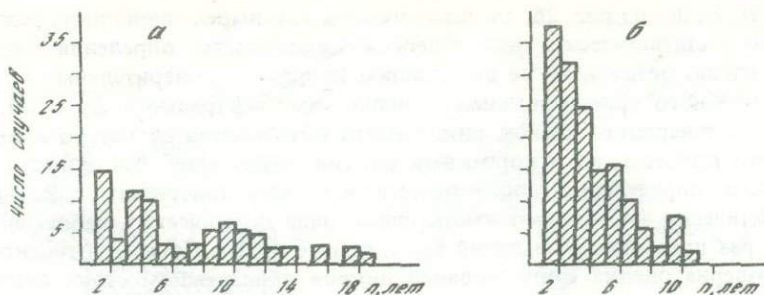


Р и с. 25. Распределение коэффициентов автокорреляции рядов подземного стока ( $R_T=1$ ) по территории СССР  
 Области развития положительных (1) и отрицательных (2) коэффициентов

Как видно из рис. 26, значительную долю в выделенной цикличности занимает статистически недостоверная цикличность, определявшаяся по достаточно резким, но не выходящим за пределы доверительных интервалов 95%-ного уровня значимости всплескам спектральных функций. Низкая достоверность оценок цикличности обусловлена не только природой самого процесса, но и короткими рядами наблюдений. Как известно, для четкого определения достоверности или недостоверности цикличности теоретически необходимо иметь длину ряда фактических наблюдений, в 5–7 раз превышающую длину выделяемого цикла. Поэтому относительно достоверна оценка существования циклов в подземном стоке лишь для сравнительно короткопериодных колебаний, т.е. до 7–8-летних, максимум – 10–11-летних.

Рассматривая с этих позиций полученные результаты, можно заключить, что в подземном стоке прослеживаются главным образом тенденции к цикличности. Но эти тенденции иногда достаточно определены. Наиболее четко и часто проявляется 2-, 4–5-летняя и 10–11-летняя цикличность. Менее четко прослеживается тенденция к 6- и 8-летней цикличности. Повышенная вероятность появления данной цикличности в подземном стоке подтверждается не только приведенным статистическим материалом, но и существованием подобной цикличности в других известных явлениях природы: квазидвухлетней цикличностью стратосферной циркуляции ветров и солнечной активности, 4-летней цикличностью скоростей вращения Земли, 5,5- и 11-летней цикличностью солнечной активности. Неизвестна пока возможная первопричина, т.е. какой-либо природный аналог 8-летней цикличности. Не исключается случайность ее появления, о чем говорит и отмеченная нечеткость проявления этих циклов в подземном стоке. Тем не менее выполненный анализ свидетельствует о реальности появления 2-, 4–5-, 8- и 11-летней цикличности в восполнении ресурсов подземных вод.

Сопоставление данных о цикличности в колебаниях уровней подземных вод и подземного стока показывает, что в подземном стоке она проявляется значительно хуже. При формальном сопоставлении цифровых данных по числу случаев установленной цикличности в процентах от общего числа расчетов может даже сложиться впечатление, что в подземном стоке цикличность вскрывается чаще, чем в уровнях подземных вод. Так, расчеты показывают, что относительно достоверная цикличность в подземном стоке вскрыта автокорреляционным анализом в 31,8% случаев, периодограммным анализом – в 21,8% случаев и спектральным анализом – в 56% случаев. В режиме же уровней подземных вод аналогичными методами достоверная цикличность вскрыта соответственно в 15, 44 и 43% случаев. Тем не менее характер проявления этой цикличности в режиме подземного стока менее убедителен по всем видам анализа. Большие всплески автокорреляционных и спектральных функций редко выходят за доверительные интервалы 95%-ного уровня значимости. Кроме того, вид автокорреляционной функции редко бывает закономерным циклическим, т.е. с неоднократным переходом из отрицательной области в положительную, кратным периоду вскрываемой цикличности. Единичные же незакономерные всплески автокорреляционных функций за пределы выбранных доверительных интервалов 95%-ного уровня значимости могут быть и случайными, как это было показано нами ранее при анализе рядов случайных чисел [Ковалев-



Р и с. 26. Гистограмма цикличности подземного стока, вскрытой спектральным анализом

а — статистически достоверная цикличность; б — тенденции к цикличности; n — период цикличности

ский, 1976]. Более того, принятая вероятностная оценка достоверности цикличности допускает, что в 5% случаев отдельные значения автокорреляционной функции могут выходить за пределы принятых доверительных интервалов (95%) даже для случайного процесса. Поэтому о достоверности цикличности уверенно можно говорить лишь тогда, когда имеются неоднократные существенные всплески автокорреляционных функций, кратные какой-то длине цикла. Автокорреляционные же функции подобного вида в подземном стоке встречаются довольно редко, что и заставляет говорить о низкой достоверности данной цикличности.

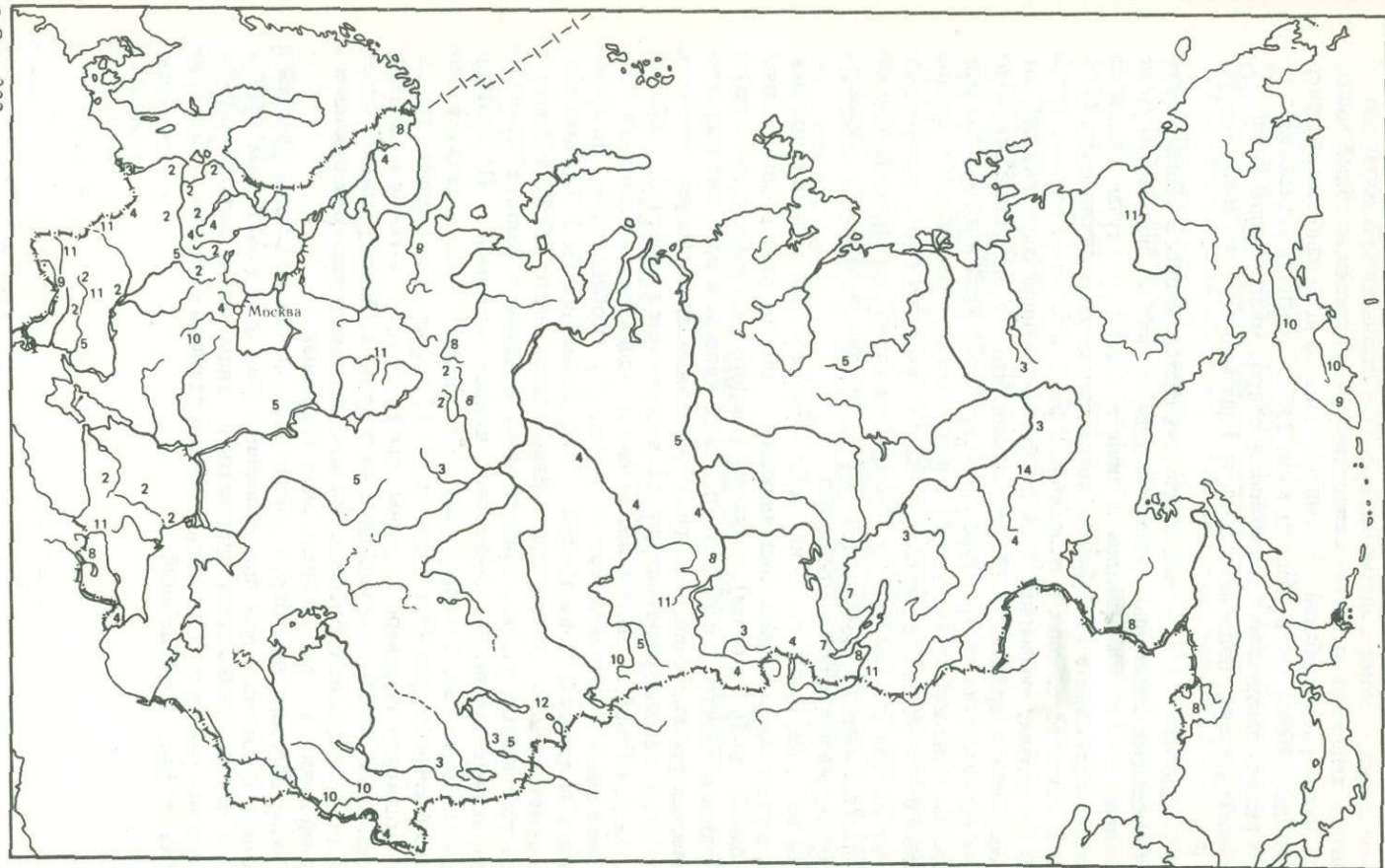
#### ОЦЕНКА ВКЛАДА ЦИКЛИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В ОБЩУЮ ДИСПЕРСИЮ ПРОЦЕССА

Ограниченность числа случаев вскрываемой достоверной цикличности обусловлена значительной долей случайных составляющих в наблюдаемых многолетних колебаниях уровней и расходов подземных вод. Это подтверждается и небольшим (в среднем) весовым вкладом амплитуд вскрываемых циклических колебаний в общий размах фиксируемых многолет-

Таблица 4

Амплитуды циклических составляющих колебаний уровней и расходов подземных вод в % от общей их многолетней амплитуды

Вскрытая достоверная цикличность	Пределы колебаний амплитуды		Среднее значение амплитуд		Преобладающие значения	
	в уровнях подземных вод	в подземном стоке	в уровнях подземных вод	в подземном стоке	в уровнях подземных вод	в подземном стоке
2-3-летняя	3-50	15-57	18	37,4	5-13	20-40
5-6-летняя	3-92	0,7-35	28	15,6	10-30	10-20
10-12-летняя	2-54	2,4-39,5	20	16,3	10-12	10-25



Р и с. 27. Характер распределения установленной достоверной цикличности подземного стока  
 2—12 — длина цикла в годах

них колебаний уровней подземных вод. Так, отношение рассчитанных по уравнению амплитуд статистически достоверных циклов к общей многолетней амплитуде колебаний подземного стока по всем наиболее достоверным циклам составляет в среднем лишь 23%. Характер распределения вехового вклада циклических колебаний в общую многолетнюю амплитуду колебаний уровней подземных вод и подземного стока иллюстрирует табл. 4.

Как видно из табл. 4, роль циклических составляющих в общем размахе наблюдаемых колебаний уровней подземных вод и в подземном стоке в большинстве случаев невелика и лишь в единичных случаях является определяющей. Даже в те моменты, когда вскрываемая цикличность находится в каких-то районах в одинаковых фазах и поэтому их амплитуды могут сложиться, суммарная доля детерминированной составляющей может составить в среднем 69% (при условии, что все указанные основные циклы присутствуют в структуре анализируемого ряда и их вклады равны среднестатистическим). Однако серии различных достоверных циклов в одном и том же ряду встречаются редко и тем более редки периоды совпадения их фаз (на чем мы еще остановимся далее), в результате чего напрашивается вывод о преобладании в большинстве случаев доли случайной составляющей над детерминированной.

Тем не менее, принимая во внимание наличие в ряде случаев существенного вклада циклической составляющей в общий размах многолетних колебаний (до 50% и более), к анализу каждого ряда наблюдений следует подходить конкретно и использовать данное явление в практике гидрогеологических расчетов лишь там, где это возможно. Здесь следует отметить, что величины амплитуд разных циклов, выраженные в процентах от общего размаха колебаний за многолетие, далеко не одинаковы в различных районах даже для идентичной цикличности (рис. 27). Особенно четко это проявляется в подземном стоке. Наиболее высокие амплитуды 2–3-летних циклов отмечаются на северо-западе Европейской части СССР, а также в некоторых южных районах Средней Азии и Дальнего Востока. Наиболее существенные амплитуды 5–6-летних циклов отмечены в Прибалтике, Среднем Поволжье, Южном Предуралье, Средней Азии, а также в верховьях бассейнов рек Оби и Енисея. 10–12-летние циклы имеют наибольшие амплитуды на севере Украины, юге Белоруссии, а также в пределах полосы вдоль 50–60° северной широты, в пределах Волго-Уральской области, Сибири и Дальнего Востока. Значительны амплитуды этих циклов и в Средней Азии – в горных и предгорных ее районах.

Таким образом, анализируя данные цикличности колебаний уровней и расходов подземных вод при решении какой-либо конкретной практической задачи, необходимо принимать во внимание не только статистическую значимость этой цикличности, но и размеры ее вклада в общий размах из многолетних колебаний.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГИОНАЛЬНОЙ ПРИУРОЧЕННОСТИ  
РАЗЛИЧНОЙ ЦИКЛИЧНОСТИ В РЕЖИМЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Оценка характерной для каждого региона продолжительности мало-водных и многоводных лет представляет большой практический интерес. Однако, к сожалению, изучение региональных закономерностей в проявлениях цикличности подземных вод по территории СССР не дало определенных результатов. Помимо упомянутых тенденций к увеличению вероятности появления и амплитуд некоторых циклов в отмеченных регионах, подобные же по продолжительности циклы или тенденции к цикличности могут встретиться и встречаются в любом другом районе (см. рис. 27). Связано это с тем, что продолжительность вскрываемых в подземных водах циклов определяется не только цикличностью или тенденциями к таковой воздействующих на подземные воды факторов, но и чисто местными гидрогеологическими условиями, и прежде всего взаимодействием различных водоносных горизонтов или различных частей одного горизонта, обладающих разной степенью инерционности режима. В связи с тем, что инерционная способность водоносных горизонтов, обусловленная степенью связи подземных вод с дневной поверхностью и интенсивностью водообмена подземных вод, даже в пределах ограниченных территорий может быть существенно различной (что за-

Т а б л и ц а 5

Характер цикличности режима уровней подземных вод отдельных территорий СССР

Гидрогеологическая станция (гидрорежимная партия)	Цикличность, выявленная методом спектрального анализа	
	достоверная	тенденция
Северо-Западная	—	7,1; 3,7
Московская	5,6	—
Эстонская	5,3	—
Литовская	5,5	2,4
Латвийская	5,3	3,3
Северо-Украинская, Львовская	14,3	4,0
Белорусская	—	4,2
Каменная степь	—	7,1; 5,3
Новосибирская, Омская	—	5,0
Горьковская	12,5	3,8
Башкирская	—	5,7
Северо-Кавказская	7,1	3,8
Грузинская	—	4,4; 6,6
Армянская	12,5	3,8
КМА	—	10; 3,3; 2,2
Нижеволжская	—	6,2
Дагестанская	—	—
Приморская	—	—
Амуро-Уссурийская	5,0	2,3
Саратовская	—	6,7
Узбекская	—	—

висит от глубин залегания подземных вод, фильтрационных свойств водовмещающих пород и скоростей фильтрации подземных вод), цикличность в колебаниях уровней и расходов подземных вод также может существенно зависеть от локальных гидрогеологических условий. Этим можно объяснить появление различных циклов в подземном стоке по существу в каждом крупном природном регионе. Поэтому для получения обобщенных представлений о возможной и наиболее характерной для каждого района цикличности подземных вод нами были проанализированы обобщенные площадные графики и их режим, составленные в относительных показателях — в процентах обеспеченности уровней и расходов подземных вод. Результаты выполненных расчетов цикличности в таких рядах приведены в табл. 5. Как видно из табл. 5, наличие статистически достоверной цикличности устанавливается далеко не всегда, а лишь в 43% случаев. Среди достоверных циклов преобладают также 5- и 12-летние, а среди тенденций к цикличности — 2–3-, 4–6-, 10-летние циклы, что хорошо согласуется с приведенными данными. Вместе с тем даже визуальный обзор всех полученных обобщенных региональных характеристик режима подземных вод и хронологических рядов наблюдений за подземным стоком показывает на нециклический незакономерный характер их многолетних колебаний. Вскрытые же спектральным анализом циклы свидетельствуют лишь о наиболее вероятных гармониках, имеющихся в структуре этих рядов.

#### **ПЕРСПЕКТИВЫ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ С УЧЕТОМ ВЕРОЯТНОЙ МНОГОЛЕТНЕЙ ЦИКЛИЧНОСТИ ПИТАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

Одна из основных задач гидрогеологии в настоящее время заключается в прогнозировании возможных естественных и искусственных изменений в подземных водах. Потребность в таких прогнозах возникает при оценках вероятности истощения запасов подземных вод и обосновании мер, направленных на рациональное их использование и охрану, определение возможных колебаний водопритоков в горные выработки, при анализе перспектив активизации карстово-суффозионных и оползневых процессов, подтопления, заболачивания и засоления земель в результате хозяйственной деятельности человека, для определения возможной изменчивости баланса подземных вод и связанных с этим изменений в экологической обстановке и т.д. Широкий круг практических задач, решаемых с учетом прогнозов режима уровней и расходов подземных вод во времени, предопределяет необходимость создания специальных служб для регулярного составления таких прогнозов, а также разработки и усовершенствования методов прогнозирования. При этом чем с большей заблаговременностью будут составляться прогнозы, тем ценнее их будет выше.

Во многих случаях прогнозы режима подземных вод должны складываться из отдельно составленных прогнозов естественного и нарушенного режима. Особенно сложно составить долгосрочные прогнозы естественного режима подземных вод, поскольку прогнозы основных режимообразующих факторов (атмосферных осадков, температур воздуха и т.д.) с соответствующей заблаговременностью пока не составляются.

В СССР служба прогнозов режима подземных вод создана в 1970 г., и с тех пор регулярно (3 раза в год) для большей части территории страны выдаются прогнозы минимальных предвесенних и летне-осенних уровней, максимальных весенних и среднегодовых значений уровней подземных вод с заблаговременностью от 2 до 7 месяцев. Методика составления таких прогнозов опубликована [Ковалевский, 1974; Коноплянцев, Семенов, 1974] и апробирована в различных природных условиях. В ее основе лежат главным образом вероятностно-статистические линейные связи прогнозируемого положения уровня с рядом определяющих его факторов, известных на момент составления прогнозов. Среди последних используются в основном данные об уровнях подземных вод, атмосферных осадках, температурах и дефиците влажности воздуха за определенные промежутки времени. Точность и оправдываемость прогнозов достаточно высоки. Однако практика требует повышения их заблаговременности до года и по возможности на несколько лет вперед. Как показали исследования, проводимые при составлении сезонных прогнозов режима подземных вод [Ковалевский, 1976], роль метеорологических факторов в формировании среднегодовых и экстремальных значений уровней и расходов подземных вод с увеличением заблаговременности составления прогнозов быстро затухает. Так, при заблаговременности прогнозов свыше 3—6 месяцев весовое значение метеофакторов, известных на момент составления прогнозов, снижается ниже 5—10% и их учет становится уже не рациональным. Поэтому прогнозы режима подземных вод на год и свыше должны строиться на принципиально иных основах, чем сезонные, да и требования к их точности должны быть, видимо, также другие, менее жесткие. Из возможных путей долгосрочного прогнозирования режима подземных вод на ряд лет вперед наиболее реальны те, которые базируются на вскрытии детерминированных и случайных закономерностей в многолетней изменчивости режима в прошлом и экстраполяции вскрытых закономерностей в будущее. К числу таких форм прогнозирования, в частности, относятся неоднократно предпринимаемые попытки использовать экстраполяцию вскрытых тем или иным путем циклов. Подобная экстраполяция осуществляется либо на основе простого продления вскрытых тенденций к цикличности в хронологическом ряду, либо на основе расчета возможных колебаний как суммы наиболее значимых гармоник, вскрытых в структуре ряда наблюдений.

Суммируя результаты изложенных исследований, можно констатировать, что тенденция к цикличности в восполнении запасов подземных вод существует, но проявляется она очень нечетко, вклады циклической составляющей в общий размах колебаний невелики и какой-либо региональной закономерности в проявлениях цикличности отчетливо не прослеживается, что свидетельствует о значительной роли в ее формировании местных гидрогеологических условий и других случайных факторов. Обзор наиболее длинных рядов хронологических наблюдений за режимом уровней подземных вод и подземного стока показывает неустойчивость отмечаемых тенденций к цикличности во времени. Каждый новый цикл по существу не повторяет предыдущий ни по его продолжительности, ни по его амплитуде. Все это затрудняет практическое использование данного явления для прогнозов на чисто детерминированной основе, так как такой процесс

должен рассматриваться преимущественно случайным. Закономерным в этом процессе можно считать лишь смену какой-то одной случайной серии маловодных лет какой-то другой также случайной серией многоводных лет, что, видимо, и следует понимать под термином "цикличность". Поэтому при определении путей долгосрочного (на один год и более) прогнозирования режима подземных вод как, по-видимому, одного из наиболее реальных должны быть рассмотрены различные варианты экстраполяции многолетних колебаний уровней и расходов подземных вод как случайного процесса. Среди них следующие:

1) экстраполяция колебаний уровней или расходов подземных вод как суммы гармоник с переменными, случайно изменяющимися амплитудами и фазами с учетом при необходимости трендовой и случайной составляющих;

2) экстраполяция колебаний уровней подземных вод или подземного стока как случайного процесса с определенной "памятью системы", т.е. экстраполяция колебаний коррелированного ряда как простого или сложного марковского процесса также с учетом выделенного тренда;

3) вероятностный анализ появления серий маловодных и многоводных лет и расчет возможной (наиболее вероятной) изменчивости уровней или расходов подземных вод в будущем;

4) экстраполяция колебаний как многофакторного процесса с учетом времени запаздывания воздействий на них ряда факторов, вскрываемого либо в явном виде (методами взаимной корреляции), и оценкой их вклада методами весовых функций, функций отклика или множественной корреляции, либо в неявном виде (методом "черного ящика" или на основе "танковых" моделей).

Перспективно также комбинирование генетического и вероятностно-статистического подходов при прогнозах режима подземных вод и планирования на этой основе рационального использования ресурсов подземных вод.

Прогнозы режима подземных вод, основанные на экстраполяции колебаний уровней последних как суммы из ряда статистически значимых гармоник, вскрытых спектральным анализом, проводились Э.А. Зальцбергом и др. [1970]. Трендовая составляющая в прямом виде при этом не выделялась, но она косвенно учитывалась в виде одной из гармоник с периодом, превышающим ряд наблюдений, если таковая оказывалась также значимой. Эти исследования показали возможность составления прогнозов режима подземных вод с заблаговременностью до 3—4 лет при достаточно высокой инерционности водоносных горизонтов. В большинстве же случаев такие прогнозы давали сравнительно достоверные результаты лишь с заблаговременностью не более 1—2 лет. Все это свидетельствует о неустойчивости цикличности и условности аппроксимации реальных колебаний уровней подземных вод в виде суммы гармонических колебаний.

Принципиальная возможность прогнозирования режима подземных вод как случайного стационарного процесса рассматривалась С.П. Сидоркиной [1970]. Однако этот подход не развивался и не исследовался с позиций гидрогеологических условий его применимости. Поэтому для анализа возможности долгосрочного прогнозирования режима подземных вод как случайного стационарного процесса нами также использовался

метод Н. Винера-Хопфа, рассмотренный в одном из его возможных вариантов С.П. Сидоркиной и несколько усовершенствованный Е.П. Архиповой. За основу прогностической модели принята линейная модель типа

$$x_{(t+\mu)} = a_1 x_{(t-1)} + \dots + a_n x_{(t-n)}, \quad (22)$$

где  $x_{(t)}$  в моменты  $t - 1, \dots, t-n$  известны и требуется предсказать значение  $x_{(t+\mu)}$  в момент времени  $(t + \mu)$ ;  $\mu$  — заблаговременность прогноза, а  $n$  — длина ряда наблюдений, используемых для прогноза. Мерой качества формулы (22) служит величина, равная среднему квадрату ошибок экстраполяции:

$$\sigma_{\mu n}^2 = M |x_{(t+\mu)} - \sum_{k=1}^n a_k x_{(t-k)}|^2, \quad (23)$$

где  $\sigma_{\mu n}$  — среднеквадратическая ошибка экстраполяции.

Задача заключалась в нахождении коэффициентов уравнения  $a_1, \dots, a_n$ , при которых  $\sigma_{\mu n}^2$  принимает наименьшее значение. Интересующие нас значения  $a_1, \dots, a_n$  находятся из системы уравнений

$$\frac{d\sigma_{\mu n}^2}{da_k} \Big|_{a_j=a_j} = R_{(\mu+k)} + \sum_{l=1}^n a_l R_{(k-l)} = 0, \quad (24)$$

где  $R_{\tau}$  — значения корреляционной функции временного ряда при сдвиге  $\tau$ . Если  $a_1, \dots, a_n$  есть решение этой системы, то формула  $x_{(t+\mu)} = a_1 x_{(t-1)} + \dots + a_n x_{(t-n)}$  будет наилучшей экстраполяционной формулой.

В качестве прогнозного уравнения использовалось уравнение

$$x_{(t+\mu)} - \bar{x} = a_1 [x_{(t-1)} - \bar{x}] + \dots + a_n [x_{(t-n)} - \bar{x}], \quad (25)$$

где  $\bar{x}$  — среднее значение исходного временного ряда.

Программа для анализа временных рядов была составлена Е.П. Архиповой для расчета на ЭЦВМ на языке FORTRAN.

Она включала.

1. Вычисление среднего значения  $\bar{x}$  на любом интервале ряда от  $N_1$  до  $N_2$ :

$$\bar{x} = \frac{1}{N_2 - N_1} \sum_{N_1}^{N_2} x_i$$

2. Вычисление корреляционной функции на любом интервале ряда от  $N_1$  до  $N_2$ :

$$R_{(\tau)} = \frac{1}{(N_2 - N_1) - \tau} \sum_{N_1}^{N_2 - \tau} (x_i - \bar{x})(x_{i+\tau} - \bar{x}).$$

3. Вычисление дисперсии на любом интервале ряда

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N_2 - N_1} \sum_{N_1}^{N_2} (x_i - \bar{x})^2}.$$

4. Решение системы уравнений (24) для нахождения линейных коэффициентов регрессии  $a_1, \dots, a_n$ .

5. Вычисление прогнозного значения  $x_{(t+\mu)}$  по уравнению (25).

С помощью указанного метода было обработано 66 рядов наблюдений за уровнями подземных вод, специально отобранных с учетом разной длины ряда (от 10 до 48 лет), с разными значениями трендов (как по знаку, так и по величине), с различной взаимосвязанностью членов ряда  $R_{\tau=1}$ . Прогнозы апробировались по искусственно несколько укороченным фактическим рядам наблюдений с тем, чтобы иметь возможность проверки результата прогноза по реально существующим, но не участвовавшим в составлении прогнозного уравнения значениям рядов.

В связи с этим на графиках, иллюстрирующих результаты расчетов, представлены спрогнозированные уровни при различной заблаговременности прогноза и фактические уровни, полученные экспериментально (рис. 28). При этом с каждым из фактических уровней сопоставляется семейство спрогнозированных уровней, отличающихся между собой тем, что получены они при разных значениях  $n$  (где  $n$  — число прогнозных членов, входящих в прогнозное уравнение).

Результаты расчетов позволяют сделать следующие выводы.

1. В рядах с  $R_{\tau=1}$ , изменяющимся в пределах от 0,1 до 0,6, наличие линейного тренда с высокими коэффициентами корреляции (до 0,4–0,7) обуславливает неудовлетворительные прогнозные значения. При этом чем больше в данном случае число прогнозных членов  $n$  используется для прогноза, тем хуже результат прогноза. Поэтому выделение тренда, когда он выражен явно, а инерционность рядов невелика, особенно необходимо (см. рис. 28, а). При слабо выраженных линейных трендах (с коэффициентом корреляции в пределах от 0,1 до 0,3) его существование слабо влияет на величину прогнозного значения. В этом случае выделение тренда желательно, но не необходимо (см. рис. 28, б).

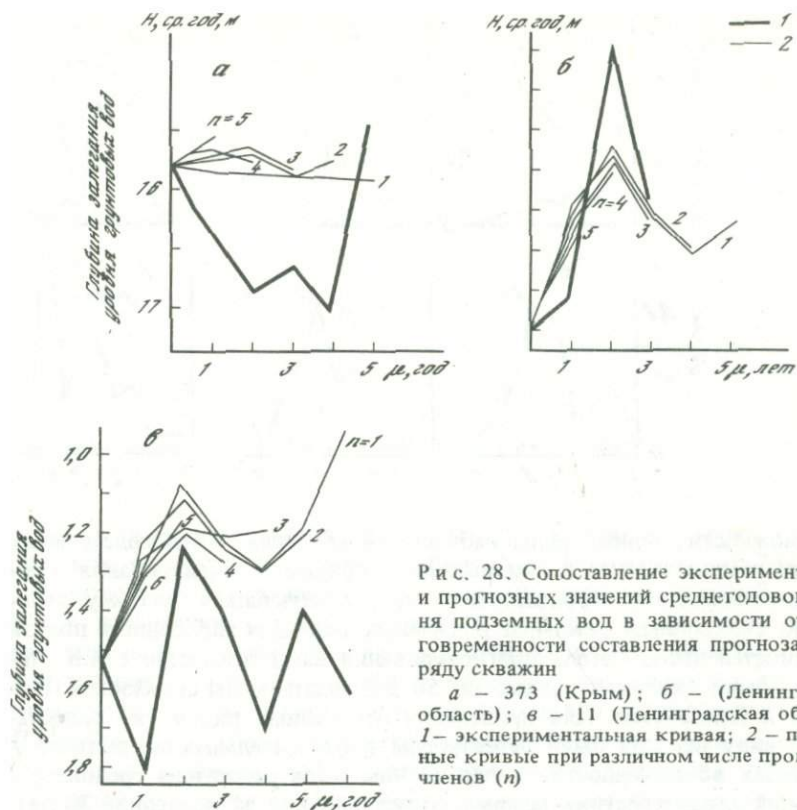
2. В рядах с  $R_{\tau=1}$ , изменяющимся в пределах 0,6–0,9, наличие линейного тренда даже с коэффициентами корреляции 0,4–0,7 допустимо, и результаты прогноза при этом бывают вполне удовлетворительны, однако выделение тренда здесь все-таки желательно (см. рис. 28, в).

3. При малой заблаговременности прогноза  $\mu$  (от 1 до 2 лет) прогнозное значение  $x_{(\mu+t)}$  слабо зависит от числа прогнозных членов, входящих в прогнозное уравнение (25).

4. При большей (свыше 2 лет) заблаговременности прогноза  $\mu$  в рядах как с малыми, так и с большими значениями  $R_{\tau=1}$  точность прогнозного значения  $x_{(t+\mu)}$  зависит от числа членов ряда, входящих в прогнозное уравнение (25), т.е. учет "памяти" системы, когда она реально существует, повышает и точность и заблаговременность составления прогнозов.

5. При заданной длине ряда  $N$  максимальная заблаговременность прогноза  $\mu_{\max} = N - n$ . Это обусловлено тем, что в систему уравнений (24) входит значение корреляционной функции  $R_{(\mu+n)}$  и  $\mu + n \leq N$ .

6. Расчеты показали, что заблаговременность составления удовлетворительных прогнозов данным способом в большинстве случаев достигает 1–2 лет, а в отдельных случаях (при  $R_{\tau=1} > 0,7$ ) до 6–7 лет. Во всех случаях точность прогноза тем выше, чем длиннее ряд наблюдений.



Р и с. 28. Сопоставление экспериментальных и прогнозных значений среднегодового уровня подземных вод в зависимости от заблаговременности составления прогноза ( $\mu$ ) по ряду скважин

а — 373 (Крым); б — (Ленинградская область); в — 11 (Ленинградская область); 1 — экспериментальная кривая; 2 — прогнозные кривые при различном числе прогнозных членов ( $n$ )

7. Точность и устойчивость прогнозов данным методом повышаются при проведении регуляризации-сглаживании корреляционной функции. Процедура регуляризации, проводившаяся по программе А.К. Чихачева, заключалась в расчете спектральной плотности [см. уравнение (20)] и обратном преобразовании Фурье сглаженной спектральной плотности, в результате которого получалась сглаженная корреляционная функция. Дальнейшее усовершенствование данного подхода к прогнозам возможно при уточнении численного решения исходного интегрального уравнения Н. Винера-Хопфа, а также при усовершенствовании программ расчета прогноза, позволяющих экстраполировать суммарно и случайную и наиболее достоверную трендовую составляющие.

Вероятностные оценки возможных колебаний в будущем могут осуществляться, по-видимому, в двух основных формах: в виде оценки наиболее вероятного перехода уровней подземных вод или подземного стока из одних наблюдаемых положений в другие — прогнозные (предложение А.К. Чихачева), а также в виде расчета наиболее вероятных продолжительностей и чередований серий маловодных и многоводных лет, которые могут наблюдаться при заданной расчетной обеспеченности уровней или расходов подземных вод.

Для реализации первого вида прогнозных оценок необходимо иметь

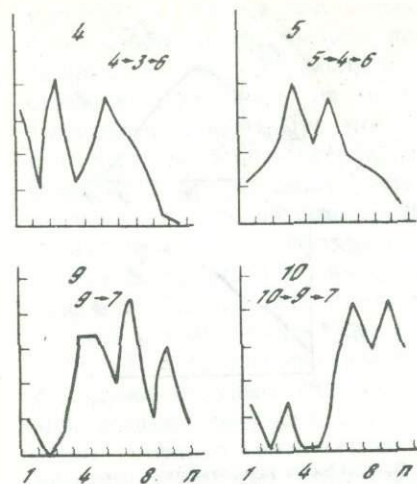
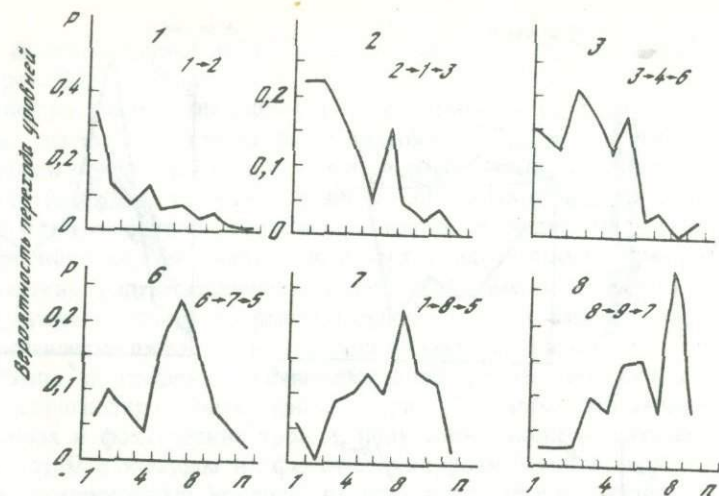


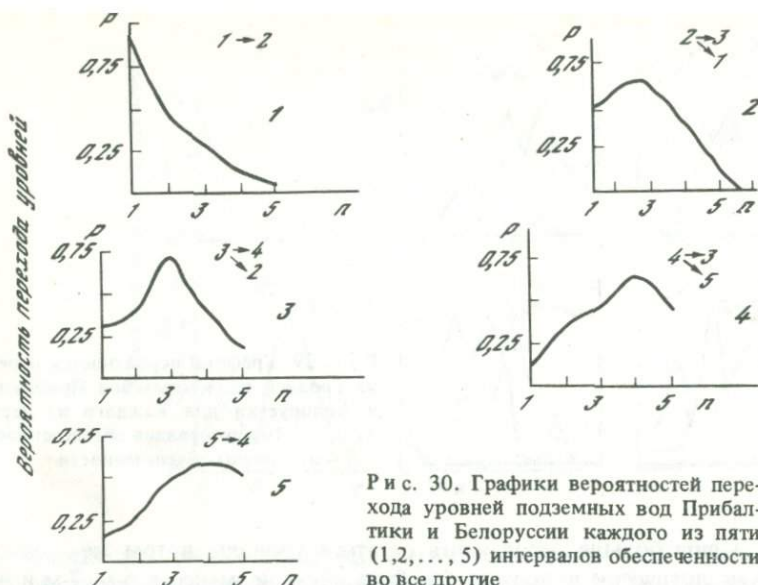
Рис. 29. Графики вероятностей перехода уровней подземных вод Прибалтики и Белоруссии для каждого из десяти (1, 2, ..., 10) интервалов обеспеченности, и — интервалы обеспеченности

по возможности длинные ряды наблюдений по серии наблюдательных пунктов, расположенных в сходных по условиям формирования режима подземных вод территориях и характеризующихся поэтому сравнительно синхронным режимом подземных вод. Для апробации и показа возможностей этого метода прогнозирования нами совместно с А.К. Чихачевым были отобраны данные по 50 наблюдательным скважинам Прибалтики и Белоруссии. Для приведения отобранных рядов к сопоставимому виду все они были перестроены в относительных показателях — в процентах обеспеченности, и уже по ним была рассчитана средняя региональная характеристика режима подземных вод за последние 30 лет.

Для оценки вероятности перехода уровней подземных вод из одного положения в другое каждый из выбранных и перестроенных в процентах обеспеченности графиков фактических наблюдений был условно разбит горизонтальными линиями, т.е. по вертикали на 10 равных отрезков, соответствующих уровням 10-, 20-, 30%-ной и т.д. обеспеченности. Затем, учитывая предпосылку о наличии во всех рядах простого марковского процесса, на ЭВМ, используя все ряды по характеру режима в прошлом, были рассчитаны вероятности перехода уровней подземных вод из каждого такого интервала во все другие, например из второго, т.е. от 10 до 20%-ной обеспеченности, в первый, третий, четвертый и т.д. Пример расчета таких вероятностей, выраженных в долях единицы, приведен на рис. 29. Как видно из данного примера, наиболее вероятен при нахождении уровней в первом интервале их переход во второй, из второго — в первый и третий, из третьего — в четвертый, из четвертого — в третий и несколько меньше — в шестой, из пятого — в четвертый и несколько меньше — в шестой и т.д. Приведенный пример показывает, что в наиболее общем случае высокие уровни имеют повышенную вероятность к снижению, а низкие, наоборот, к повышению. Однако раздел между этими тенденциями не проходит четко по 5-му или 6-му интервалу, т.е. по 50%-ной обеспеченности, хотя в 6-м интервале вероятности переходов к подъему и спаду уровней практически одина-

ковы, а еще больше вероятность остаться уровням в том же положении, как логически и должно бы быть. Тем не менее в 6-м, 7-м и даже 8-м интервалах вероятность к дальнейшему снижению уровней выше, чем к повышению. И лишь в 9-м и 10-м интервалах отмечена устойчивая тенденция к повышению вероятностей на последующий подъем уровней подземных вод. Это связано с наличием отрицательного тренда в многолетних колебаниях уровней подземных вод в данном регионе.

Пилообразный характер кривых вероятностей переходов уровней из одного положения в другое определяется ограниченностью рядов наблюдений, т.е. малой их продолжительностью и общим числом, что ограничило объем общей выборки в целом и по каждому возможному варианту смен положений в частности. Увеличение числа возможных переходов уровней из одного интервала в другой при сравнительно коротких рядах наблюдений возможно либо за счет увеличения числа анализируемых скважин, либо за счет уменьшения числа интервалов между градациями на графике. В качестве примера (рис. 30) приведен график вероятностей для той же группы скважин, но при разбивке их графиков лишь на 5 интервалов, т.е. через 20% обеспеченности. Здесь видно, что характер вероятностных кривых переходов уровней из одного положения в другое стал более плавный и закономерный. Однако при этом следует иметь в виду, что точность прогнозов за счет более грубой разбивки интервалов снижается. Поэтому лучше увеличивать число анализируемых скважин и повышать тем самым достоверность таких прогнозов. Данный подход к прогнозам режима подземных вод может быть применен как для отдельных скважин, так и, что особенно важно, для отдельных территорий в целом, чего до сих пор не делалось вообще. Более того, сам принцип обобщения вероятностных закономерностей возможных переходов уровней подземных вод из одних положений в другие по региональным материалам позволяет составлять именно региональные прогнозы, которые могут строиться на базе обобщенных региональных характеристик режима уровней подземных вод. Пример такого прогноза и сопоставление его с реальной

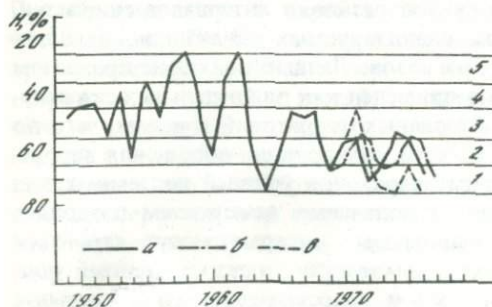


Р и с. 30. Графики вероятностей перехода уровней подземных вод Прибалтики и Белоруссии каждого из пяти (1, 2, ..., 5) интервалов обеспеченности во все другие

региональной изменчивостью уровней подземных вод Прибалтики и Белоруссии, начиная с 1969 г., приведены на рис. 31. Для прогнозов графики разбивались на 10 интервалов.

Вероятностный анализ возможных продолжительностей маловодных и многоводных серий как основа для прогноза гарантированной восполнением эксплуатации подземных вод не дает возможности составить календарный прогноз, так как определить достаточно достоверно время наступления очередной маловодной серии нельзя. Поэтому данный метод анализа относится не к категории прогнозов, а скорее к категории прогнозных расчетов. Этот вопрос будет рассмотрен детальнее в гл. 5.

И, наконец, группа прогнозов, основанная на экстраполяции колебаний уровней или расходов подземных вод, включая подземный сток как многофакторный процесс. В отличие от предыдущих вариантов прогнозирования, в основе которых лежало лишь вскрытие закономерностей в структуре наблюдаемого ряда и его экстраполяция в будущее с учетом этих закономерностей, в данном случае исследуются



Р и с. 31. Обобщенный хронологический график многолетних колебаний уровней подземных вод Прибалтики и Белоруссии, выраженных в процентах обеспеченности

*a* – фактическое значение; *b* – прогнозное значение; *в* – эпигнозное значение; 1, 2, ..., 5 – интервалы обеспеченности; *H* – уровни подземных вод в процентах обеспеченности

зависимости режима подземных вод от определяющих его факторов. Возможности долгосрочного прогнозирования режима подземных вод базируются на инерционной способности водоносных горизонтов отражать воздействия на него различных факторов с определенным временным сдвигом. При этом чем больше будет такой временной сдвиг, тем большая заблаговременность прогнозов может быть достигнута. Один из таких способов учета инерционности системы для прогнозов заключается в способности уровней подземных вод отражать интегрально увлажненность или интенсивность питания подземных вод за ряд предшествующих лет. Эту способность можно установить путем построения графиков зависимости величин коэффициентов корреляции, связи уровней и атмосферных осадков, суммируемых за ряд лет [Ковалевский, 1976]. Так, низкие коэффициенты корреляции уровней подземных вод с осадками текущего года увеличиваются при корреляции уровней с суммой осадков текущего и предыдущего года. По экстремуму кривых таких графиков связи можно установить среднюю интенсивность водообмена водоносного горизонта, а также определить количество лет, данные об осадках которых необходимо принимать во внимание для составления прогнозов. Коэффициенты корреляции таких связей могут быть увеличены, если вместо осадков суммировать разности между осадками и испарением. Возможности составления прогнозов режима на этой основе увеличиваются с увеличением инерционности, так как чем она больше, тем большая в процентах часть осадков из необходимого для прогноза периода известна на момент составления прогноза. Малоперспективными для долгосрочного прогнозирования оказались гелиогеофизические связи подземных вод. Изучение этих связей на массовом материале показало, что корреляционные связи режима уровней подземных вод и подземного стока с различными формами солнечной активности, как правило, низкие, неустойчивые во времени, несут черты случайности (наличие прямых и обратных связей в локальных районах) и явно недостаточны для составления прогнозов. Более тесными оказались связи с рядом типов атмосферной циркуляции Дзердзеевского. Однако атмосферная циркуляция с достаточной для практики точностью не прогнозируется. Поэтому единственной возможностью для прогнозов на этой основе может быть учет запаздывания в связях режима подземных вод и атмосферной циркуляции, которое, судя по кросскорреляционным функциям этих процессов, достигает чаще всего не более одного года. Таковой может быть и заблаговременность составления прогнозов на данной основе. Методические пути реализации данной формы долгосрочного прогнозирования, как уже указывалось, могут быть различными. В любом случае в качестве первого этапа исследований требуется на основе кросскорреляционного анализа установить временные сдвиги в связях режима подземных вод с основными режимообразующими факторами, а также оценить их весовой вклад в прогнозируемые значения режима подземных вод. Затем с учетом вскрытых временных сдвигов производится прогноз режима методами множественной корреляции [Ковалевский, 1976], по функциям отклика [Gottshalk, Nordberg, 1979], а также методами "черного ящика" или весовых функций [Огильви, Плетнев, 1968; Плетнев, 1970].

## ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОННОСТИ И АСИНХРОННОСТИ РЕЖИМА УРОВНЕЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И ПОДЗЕМНОГО СТОКА

### СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Основной задачей данных исследований послужило изучение пространственно-временных, региональных закономерностей многолетнего режима подземных вод. При этом нами были поставлены и решались следующие взаимосвязанные вопросы.

1. Существуют ли вообще в режиме подземных вод какие-либо региональные закономерные многолетние изменения, или эта изменчивость чисто случайный, незакономерный процесс, различный в каждой точке наблюдений?

2. Если такие региональные многолетние закономерные изменения в режиме подземных вод действительно имеются, то осуществляются ли они синхронно по всей территории СССР, или в их проявлениях существует какая-нибудь пространственно-временная закономерная последовательность?

3. Можно ли провести какое-либо районирование территории СССР по особенностям и закономерностям многолетнего режима подземных вод, а также можно ли дать обобщенно характеристику этого режима или типизировать этот режим для отдельных районов страны?

4. Можно ли достоверно экстраполировать данные о многолетнем режиме подземных вод, полученные для какой-либо опорной точки, на всю территорию или на другую аналогичную в гидрогеологической отношении точку, а также в какой мере можно пользоваться подобной экстраполяцией для практических гидрогеологических расчетов, если она принципиально возможна?

5. Существуют ли достаточно устойчивые и высокие корреляционные связи между режимами подземных вод отдельных регионов, позволяющие составлять долгосрочные прогнозы режима подземных вод одних регионов на основе данных о режиме в других, т.е. с учетом временных сдвигов не только во времени, но и в пространстве.

Решение поставленных вопросов, помимо теоретического интереса, имеет большое практическое значение, поскольку продолжительность наблюдений за режимом подземных вод, используемых при оценках запасов подземных вод, обычно недостаточна для выявления многолетних закономерностей режима. Поэтому использование существующих на сегодня единичных опорных точек со сравнительно продолжительными рядами наблюдений для оценок региональных закономерностей многолетней изменчивости ресурсов подземных вод резко повысило бы и достоверность оцениваемых ресурсов и запасов подземных вод и дало бы основу для научного обоснования планирования их рационального освоения.

Термины "синхронность" и "асинхронность" режима подземных вод еще не установились. Обычно под синхронностью режима подземных вод

и подземного стока подразумевается однотипность характера колебаний уровней и расходов подземных вод в сезонном и многолетнем разрезе. В данном случае нами рассматривается многолетняя синхронность режима подземных вод и подземного стока. Оценивается она по степени совпадения во времени группировок лет с повышенной или пониженной относительно многолетней нормы водностью для различных территорий страны. При этом синхронными считаются колебания уровней или расходов подземных вод по сравниваемым водопунктам или районам тогда, когда отмечается совпадение во времени с положительным коэффициентом корреляции характера водности отдельных групп лет, а асинхронными, когда такого совпадения нет (коэффициенты корреляции сравниваемых рядов отрицательны). Асинхронность может быть частичной и полной. Для частичной асинхронности характерен некоторый сдвиг во времени наблюдающихся периодов наступления экстремальных значений многолетних колебаний уровней или расходов подземных вод при сохранении общей однотипности их колебаний в сравниваемых районах. Для полной асинхронности свойствен противоположный ход колебаний, т.е. когда увеличение запасов подземных вод в одних районах сопровождается их истощением в других. Наряду с терминами "синхронность" и "асинхронность" режима иногда употребляют аналогичные им термины "синфазность" и "асинфазность", под которыми подразумевается однозначный или противоположный ход многолетней обводненности не отдельных лет, а целых фаз колебаний на протяжении длительных периодов наблюдений, охватывающих неоднократно смену групп лет повышенной и пониженной водности.

Исследования синхронности и асинхронности режима подземных вод привлекали внимание многих исследователей: Н.Ф. Дементьева [1963], А.И. Субботина [1966], А.А. Коноплянцева [1970], А.А. Коноплянцева и С.М. Семенова [1974], В.С. Ковалевского [1976] и др. Аналогичные работы проводились ранее многими гидрологами: Т.Н. Качуковой [1955], К.П. Воскресенским [1962], Н.В. Сомовым [1963а,б], Г.П. Калининным [1968], П.С. Кузиным [1970] и др.

Синхронность режима подземных вод изучалась либо при определении условий формирования подземных вод вообще, либо при необходимости обоснования экстраполяции данных наблюдений за режимом подземных вод или их прогнозов на площадь, либо с целью использования данного явления как основы для прогнозов режима подземных вод. В будущем при проектировании регионального перераспределения водных ресурсов страны решение проблемы синхронности и асинхронности режима подземных вод и подземного стока может помочь в выборе оптимальных режимов перебросок и районов отбора подземных или поверхностных вод с целью минимизации ущерба от перебросок по гидрологическим показателям как в зонах отъема, так и в зонах транспортировки стока (т.е. уменьшение величин подпора и площадей подтопления городских и сельскохозяйственных территорий, уменьшение фильтрационных потерь из каналов и водохранилищ, уменьшение ущерба эксплуатационным ресурсам подземных вод на существующих и проектируемых водозаборах).

Несмотря на то что попытки выявить какую-либо закономерность в синхронности и асинхронности режима подземных вод по отдельным

частям территории СССР уже неоднократно в той или иной форме принимались, методика этих исследований, которая учитывала бы все особенности режима подземных вод, до сих пор еще в должной мере не разработана и перспективных путей ее решений не определено.

До настоящего времени синхронность выявлялась или путем визуального сопоставления хронологических или интегральных графиков многолетних колебаний уровней подземных вод, или на основе парных корреляционных связей наиболее длинных рядов наблюдений в различных сопоставляемых районах. Использовалось для этого обычно ограниченное число наблюдательных точек, подобранных, как правило, случайно, без должного обоснования представительности этих точек для каждого конкретного района, а также не охватывающих даже относительно равномерно изучаемые территории.

Анализ многолетних закономерностей режима подземных вод показывает, что исследование региональной синхронности и асинхронности режима подземных вод должно осуществляться с учетом различных критериев или признаков, отражающих количественно особенности режима подземных вод или подземного стока отдельных природных регионов в течение длительных промежутков времени. К таким основным признакам характера многолетнего режима подземных вод должны относиться следующие.

1. Наличие или отсутствие определенно направленного многолетнего тренда в колебаниях уровней подземных вод или подземного стока, т.е. знак этого тренда, его линейность или нелинейность, градиент (т.е. средние темпы многолетнего снижения или подъема уровней подземных вод или изменений величин подземного стока).

2. Наличие или отсутствие определенной цикличности в многолетней изменчивости подземных вод (как статистически достоверной, так и лишь установленной тенденции к существованию цикличности).

3. Характер интегральной направленности естественного питания подземных вод по определенным промежуткам времени, выявляемой по хронологическим или интегральным графикам, включая учет продолжительности и размаха относительных отклонений от многолетней нормы величин питания подземных вод, приуроченность минимальных и максимальных за многолетие значений уровней подземных вод или подземного стока к определенным годам.

4. Корреляционная взаимосвязанность сравниваемых рядов с учетом знака связей и величин временных сдвигов этих связей, выявляемых кросскорреляционным анализом, в пределах определенных регионов.

Дополнительными критериями могут также служить:

1. Однотипность характера корреляционной взаимосвязанности режима уровней подземных вод или подземного стока сравниваемых рядов или районов с основными режимообразующими факторами глобального масштаба (такими, как атмосферная циркуляция, солнечная активность, распределение наземных полей атмосферного давления).

2. Представительность режима подземных вод и подземного стока для каких-то определенных природных регионов с конкретным геологическим и гидрогеологическим строением, а также орографией и климатом. Учет геологических условий при этом может осуществляться как

прямо (группированием рядов на основе гидрогеологического районирования территорий), так и косвенно — на основе анализа степени динамичности (по  $C_v, \sigma$ ) или инерционности режима подземных вод (по  $R_{\tau=1}$ ), а также по модулям подземного стока.

Опыт показывает, что районирование любой крупной территории по синхронности и асинхронности режима подземных вод с полным учетом всех перечисленных критериев чрезвычайно сложно и, по-видимому, возможно лишь с применением ЭВМ. Для этой цели, например, могут быть применены методы распознавания образов или факторного анализа.

Однако решению этой задачи должно предшествовать детальное изучение режима подземных вод и подземного стока с целью предварительного районирования изучаемой территории по каждому из выделенных критериев в отдельности, выявления весовой роли и возможной соподчиненности различных признаков многолетнего режима подземных вод.

Опыт предыдущих исследований, в частности, показал, что выявление регионов с синхронным и асинхронным режимом подземных вод часто не дает однозначного решения, и поэтому районирование территорий по особенностям их многолетнего режима во многом зависит от интуиции исследователя и субъективных факторов. Причины этого различны.

Так, при использовании для анализа закономерностей многолетней изменчивости режима уровней подземных вод единичных и тем более случайно подобранных наблюдательных скважин не исключается возможность того, что в каких-то случаях проанализированные данные наблюдений не будут репрезентативными для данной территории. С подобными фактами приходилось неоднократно сталкиваться при проведении картирования прогнозов режима подземных вод [Ковалевский, Челидзе, 1974]. Весьма часто даже на локальных площадях полной синхронности режима подземных вод по всем скважинам не наблюдается. Связано это иногда с тем, что режим подземных вод во многих случаях существенно нарушен различными видами хозяйственной деятельности человека, приводящей к разной направленности многолетних изменений, наблюдаемых в режиме и ресурсах подземных вод. Встречаются и просто аномальные ряды наблюдений, обусловленные некачественными замерами, засоренностью скважин, зарастанием фильтров и т.д.

Трудность сопоставления данных наблюдений за режимом подземных вод кроется и в разнообразии условий их формирования. Известно, что режим подземных вод определяется значительным числом различных факторов. При этом в одних случаях доминирующее влияние имеют одни из них, например транспирация леса, инфильтрация галых вод, атмосферных осадков, а в других — подпор от реки, перераспределение напоров от областей питания водоносного горизонта и т.д. Как известно, значительную роль в определении величин питания и распределения его во времени играют и такие геологические условия, как глубина залегания подземных вод, литология водовмещающих пород, граничные условия, степень дренированности пласта и т.д., в значительной мере обуславливающие особенности режима подземных вод. Все это определяет отличие характера колебаний уровней подземных вод разных наблюдательных точек. По существу одинаковых величин колебаний уровней или расходов подземных

вод в природе встретить практически невозможно. Все они в какой-то мере отличаются одна от другой сроками наступления минимальных и максимальных величин, темпами их подъемов и спадов, амплитудами колебаний и даже количеством всплесков, определяемых инфильтрацией атмосферных осадков, так как частота и интенсивность их выпадения по площади также крайне неравномерны. Например, сдувание снега ветром с одних участков на другие в течение ряда лет с преобладанием одной из форм атмосферной циркуляции может определить истощение запасов подземных вод на одних участках водоносного горизонта и накопление их на других, даже в пределах сравнительно локальных территорий. Изменение направленности циркуляционных процессов с одной формы на другую может способствовать перераспределению площадей с наблюдаемым естественным накоплением или истощением запасов подземных вод.

Этим, по-видимому, можно объяснить наличие разнонаправленных трендов в многолетних колебаниях уровней подземных вод, характеризующихся чисто естественным режимом подземных вод, даже в пределах одного и того же природного региона. Для анализа многолетнего режима подземных вод нами использовалось 17 наблюдательных скважин, из них 8 скважин в Белоруссии имеют положительный многолетний тренд, а 9 — отрицательный. Соотношение числа отрицательных и положительных трендов для скважин Кустанайской области составило 7 : 17, для Львовской — 4 : 6 и т.д. При этом часто трудно сказать, какая из этих групп скважин типична или нетипична для данного района, так как каждая из них отражает свою группу природных условий, характерных для определенной территории. Выбор для анализа синхронности режима подземных вод случайных скважин или родников без соответствующего анализа в таких условиях может дать совершенно случайную и противоречивую картину, резко отличную от действительной. Отсюда очевидно, что использование единичных водопунктов для характеристики режима подземных вод каких-либо территорий вообще недопустимо (хотя это и делается некоторыми авторами). Все это доказывает, что для исследования региональной синхронности и асинхронности режима подземных вод необходим тщательный выбор групп репрезентативных скважин, объективно отражающих особенности многолетнего режима подземных вод какой-то территории.

Наиболее объективную для решения данной задачи информацию могут дать обобщенные региональные характеристики режима подземных вод, интегрально отражающие наиболее общие черты режима подземных вод по ансамблям репрезентативных наблюдательных точек какого-либо природного региона в целом.

Примеры таких графиков для значительной части территории деятельности гидрогеологических станций страны приведены на рис. 12. Даже визуальное сопоставление этих графиков указывает на существенную асинхронность режима подземных вод отдельных регионов. Данный вывод практически невозможно сделать путем сопоставления или парной корреляции хронологических графиков колебаний уровней подземных вод по отдельным скважинам различных регионов. В силу многочисленных искусственных и естественных воздействий (часто далеко не очевидных)

и частично из-за наличия временных сдвигов в колебаниях, зависящих от инерционности водоносных горизонтов, в каждом районе могут быть найдены серии скважин, имеющих различные особенности многолетнего режима подземных вод.

Все изложенное свидетельствует о том, что процесс асинхронности режима подземных вод целесообразно изучать только на массовом материале, по возможности с учетом обобщенных региональных характеристик режима и, что особенно важно, с учетом различных признаков возможной многолетней и сезонной изменчивости режима подземных вод, характеризующих различный масштаб или уровень этой изменчивости.

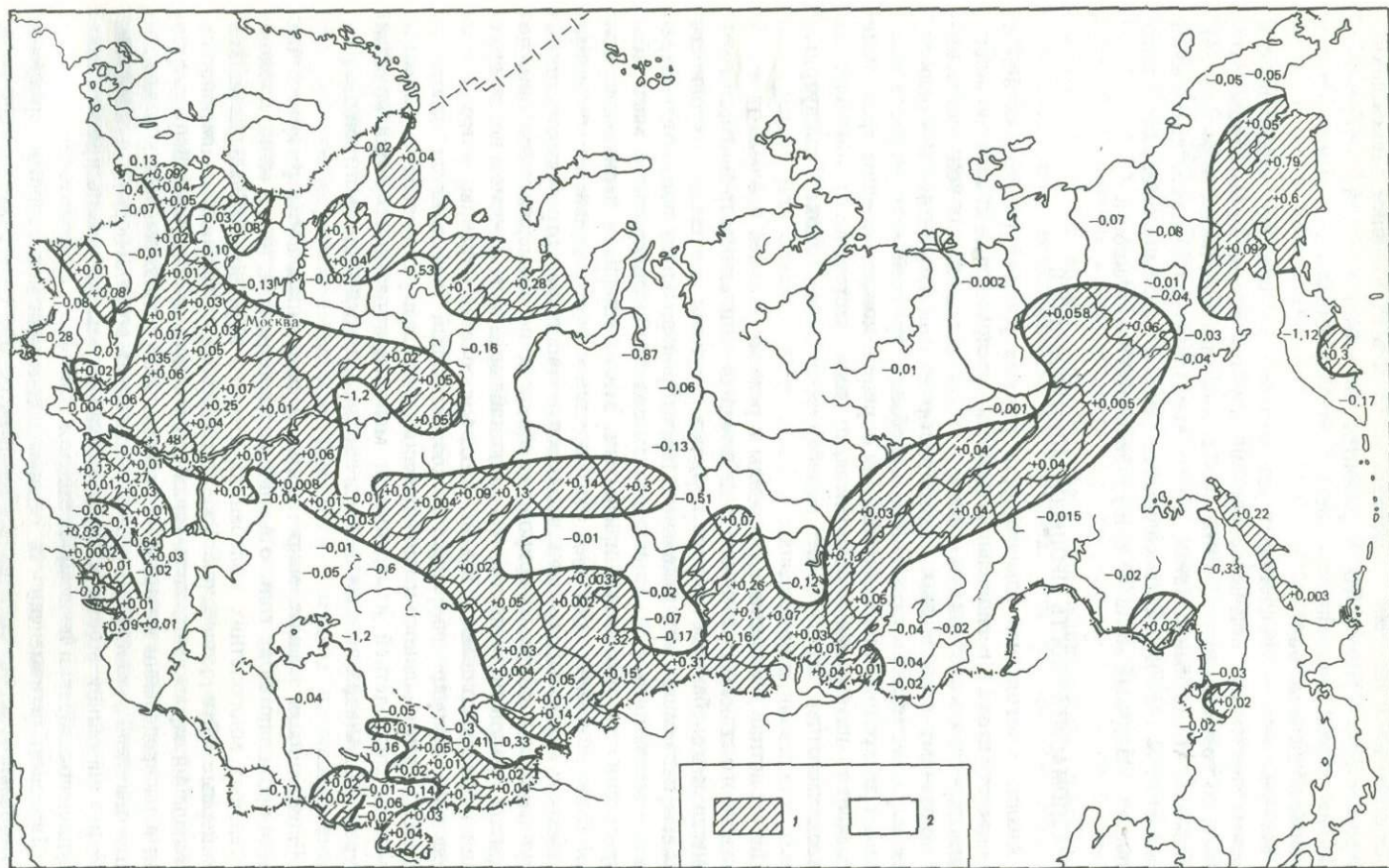
### РАЗНОМАСШТАБНОСТЬ ПРОЦЕССА АСИНХРОННОСТИ

Анализ многолетней изменчивости режима уровней подземных вод и подземного стока в региональном плане показал, что процесс асинхронности в многолетних колебаниях уровней и ресурсов подземных вод проявляется по-разному в различных характеристиках этой изменчивости. Среди таких характеристик, отражающих колебания уровней или ресурсов подземных вод различного масштаба или порядка, можно выделить трендовые изменения, интегральные относительно низкочастотные и циклические высокочастотные многолетние колебания, а также годовые и внутригодовые или сезонные изменения.

Многолетние тенденции или тренды в режиме уровней подземных вод и подземного стока, выражаемые линейным или нелинейным трендом, следует отнести к колебаниям первого порядка. Другими словами, синхронность режима подземных вод отдельных территорий по этому показателю отражает изменчивость режима подземных вод наиболее крупного масштаба, определенную глобальными причинами. Эти изменения в первую очередь, как было показано (гл. 2), связываются с глобальными изменениями климата и, как уже отмечалось, являются, по-видимому, отрезками каких-то крупных многовековых природных циклов, несоизмеримо больших по периоду продолжительности, чем ряды наблюдений за режимом подземных вод и подземного стока. Кроме того, многолетние тренды — это еще и следствие суммарного эффекта хозяйственной деятельности человека. Характер регионального распределения трендов с различными знаками и темпами многолетней изменчивости модулей подземного стока показан на рис. 32. Анализ возможных причин такого распределения трендов рассмотрен ранее.

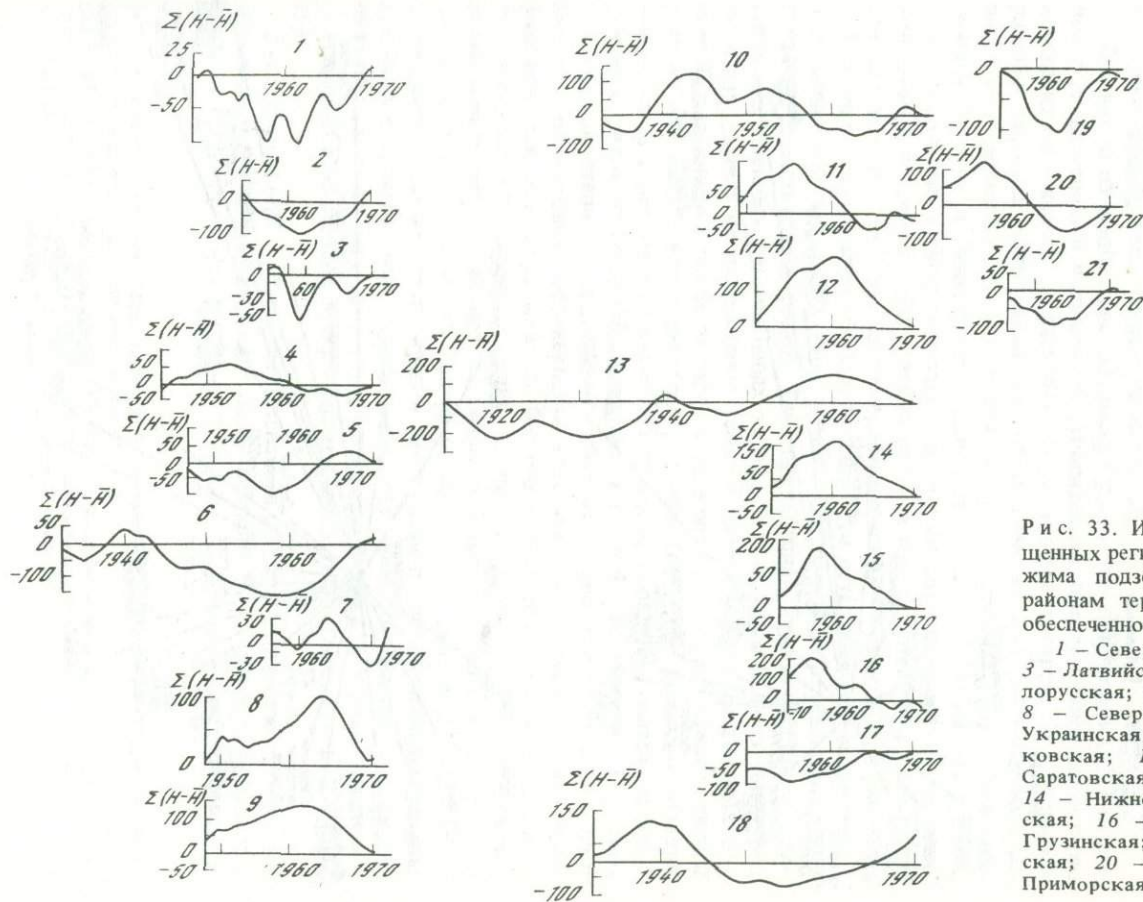
Синхронность и асинхронность режима подземных вод в региональном плане проявляются не только в многолетних трендах, но и в менее продолжительных многолетних колебаниях второго порядка, накладывающихся на первые. Эти колебания уже соизмеримы с периодом имеющихся наблюдений за режимом подземных вод и подземным стоком. Выражаются они в распределении во времени минимальных и максимальных за многолетие значений уровней и расходов подземных вод или периодов повышенной и пониженной водности относительно нормы, что важно при планировании использования подземных вод.

Многолетняя изменчивость режима подземных вод второго порядка в региональном плане оценивалась нами на основе интегральных графиков.



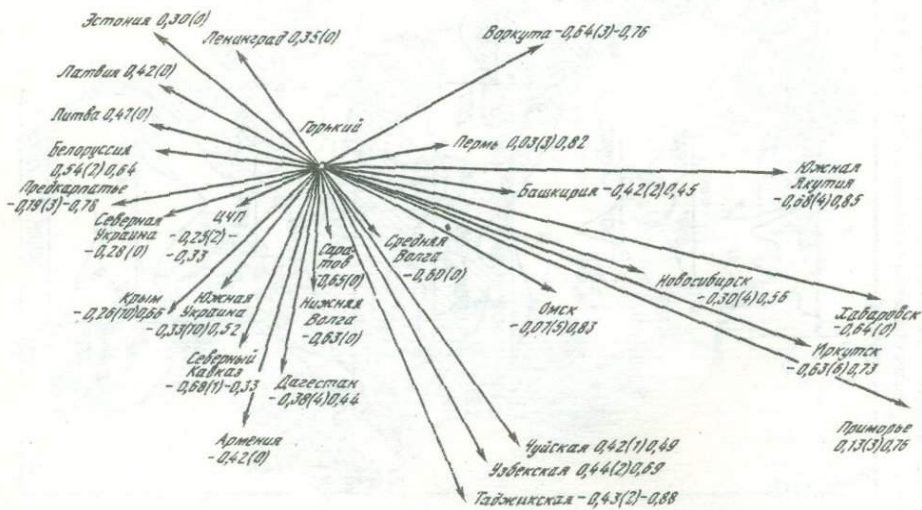
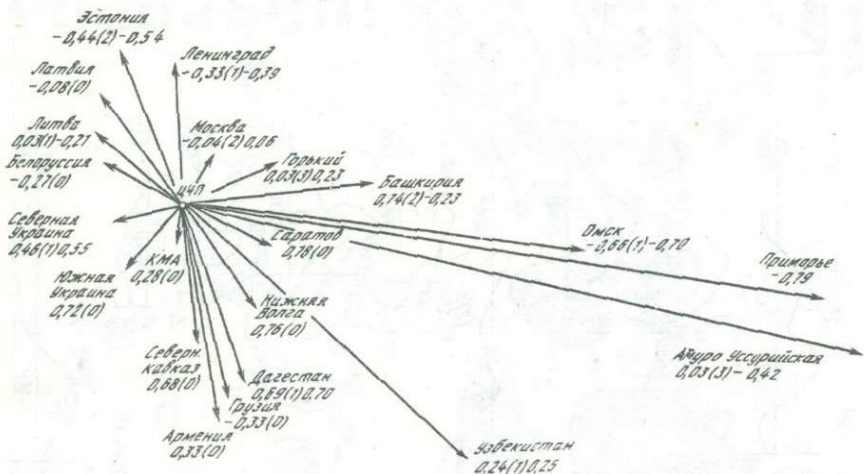
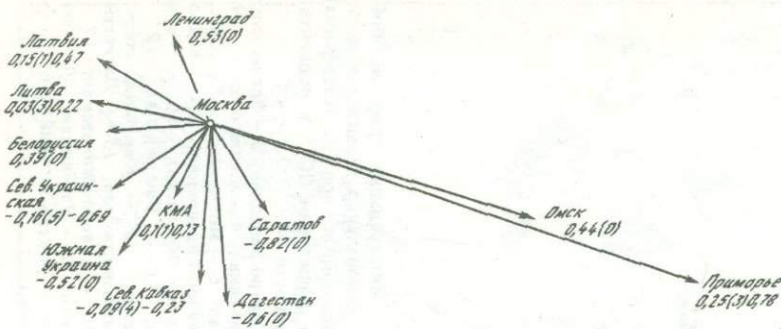
Р и с. 32. Темпы среднегогодечного увеличения и уменьшения расходов подземного стока в  $\text{м}^3/\text{с}$  в год

1 – районы с преимущественным развитием положительных трендов; 2 – районы с преимущественным развитием отрицательных трендов



Р и с. 33. Интегральные графики обобщенных региональных характеристик режима подземных вод по отдельным районам территории СССР в процентах обеспеченности

1 - Северо-Западная; 2 - Эстонская; 3 - Латвийская; 4 - Литовская; 5 - Белорусская; 6 - Московская; 7 - КМА; 8 - Северо-Украинская; 9 - Южно-Украинская; 10 - Крымская; 11 - Горьковская; 12 - Саратовская; 13 - Каменная степь; 14 - Нижневолжская; 15 - Дагестанская; 16 - Северо-Кавказская; 17 - Грузинская; 18 - Узбекская; 19 - Омская; 20 - Амуро-Уссурийская; 21 - Приморская



построенных по всем рядам подземного стока, а также по обобщенным региональным характеристикам режима уровней подземных вод. Целью такого анализа было выявление распределения по площади СССР периодов повышенной и пониженной водности подземных вод относительно средней многолетней нормы, определенной сравнительно длиннопериодной цикличностью в колебаниях уровней и расходов подземных вод. Эту цикличность трудно уловить любыми методами анализа периодичности временных рядов из-за относительной непродолжительности наблюдений за режимом подземных вод и подземным стоком, о чем уже говорилось. Примеры таких интегральных графиков региональных характеристик режима подземных вод приведены на рис. 33.

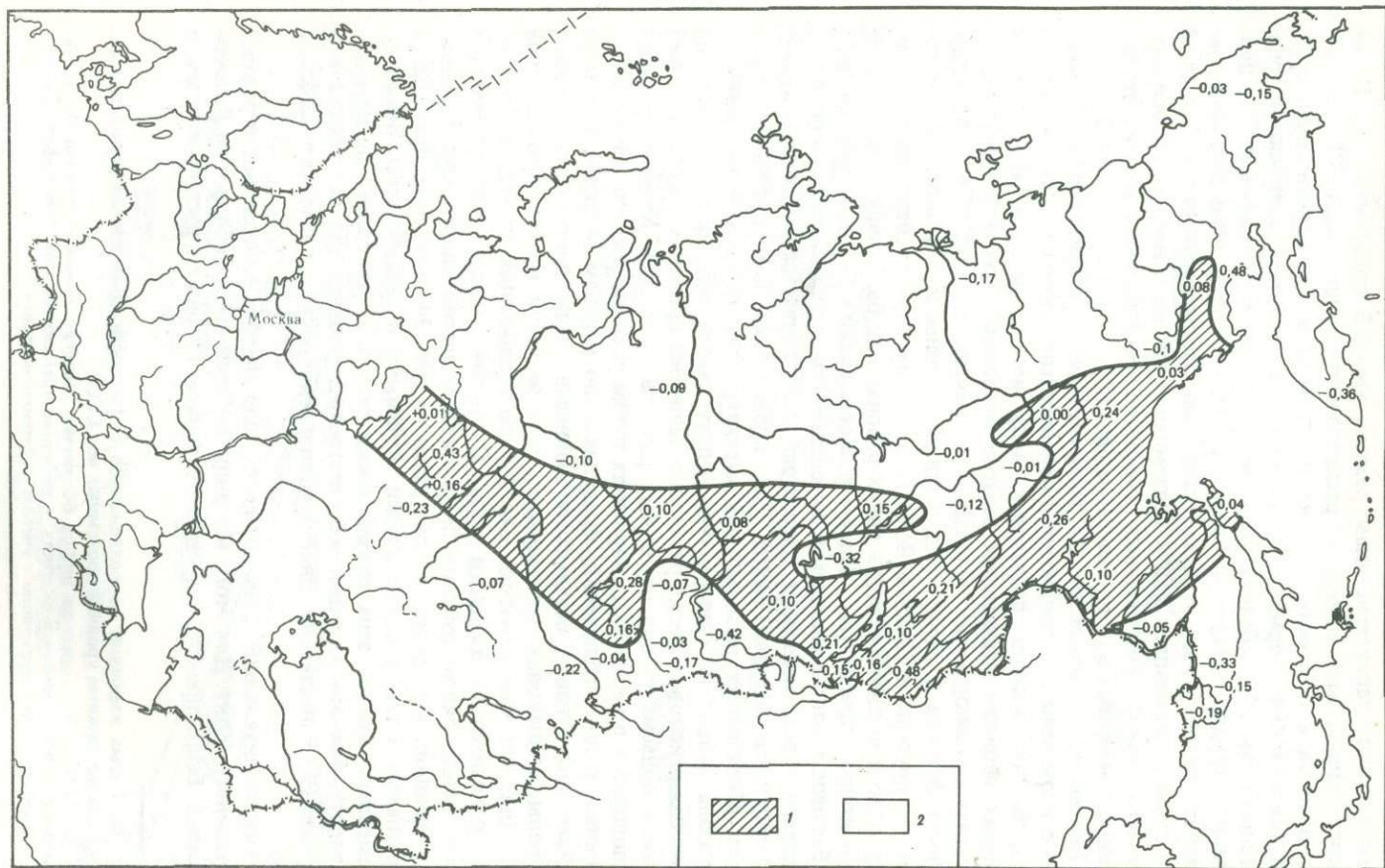
Как видно из данных рис. 33, распределение по территории СССР периодов с повышенной и пониженной относительно нормы водностью лет (по восполнению запасов подземных вод) весьма пестрое. В отдельных районах периоды накопления запасов подземных вод почти точно соответствуют периодам их истощения в других районах (см., например, районы Эстонии и Ленинграда, с одной стороны, и Украины — с другой, или Белоруссии и Нижней Волги). В других случаях периоды накопления запасов подземных вод в одних районах как бы сдвинуты во времени относительно других (см., например, Московский и Горьковский районы).

Различная направленность в интенсивности естественного восполнения подземных вод отдельных территорий подчеркивается корреляционными связями сравниваемых рядов. Так, проведенная нами кросскорреляция серии обобщенных региональных характеристик режима подземных вод показала далеко не одинаковую тесноту связей режима подземных вод смежных районов, а также различные величины временных сдвигов связей режима подземных вод отдельных районов (рис. 34). Кросскорреляция выполнялась в нескольких вариантах путем установления связей наиболее длинных рядов наблюдений, имеющихся по районам Москвы, Горького и Каменной степи с остальными районами. Этим достигалась, с одной стороны, одинаковая достоверность всех значений кросскорреляционной функции, так как короткий ряд без его уменьшения сдвигался при расчете относительно длинного ряда. С другой стороны, устанавливались связи между рядом районов по различным направлениям. Связи различных районов, как видно из диаграмм на рис. 34, оказались прямыми и обратными, а также статистически значимыми и незначимыми. Величины временных сдвигов этих связей также различны (от одного до нескольких лет). Все это уже дает количественную основу для разделения территории СССР по степени синхронности и асинхронности режима подземных вод.

Аналогичная оценка была проведена для анализа асинхронности режима подземного стока. Для этого все ряды наблюдений в Сибири и на Дальнем Востоке были прокоррелированы с одним из рядов, расположенным в

Рис. 34. Схема взаимной корреляционной связанности обобщенных региональных характеристик режима уровней подземных вод СССР

— 0,64 (3) — 0,76 — первая цифра обозначает коэффициент корреляции без учета временного сдвига, цифра в скобках — величина временного сдвига и цифра за скобкой — коэффициент корреляции с учетом временного сдвига



Р и с. 35. Распределение прямых (1) и обратных (2) взаимосвязей режима подземного стока для районов Сибири и Дальнего Востока  
 Цифры на карте – коэффициенты корреляции (по данным факторного анализа)

Предуралья. Результаты этих расчетов приведены на рис. 35. Как видно из рис. 35, режимы подземного стока северных и средних широт, с одной стороны, и средних и южных — с другой, явно асинхронны.

Из интегральных графиков, диаграмм и карты (см. рис. 33—35) видно, что часто режимы подземных вод далеко расположенных между собой районов (например, районы Москвы и Узбекистана) более схожи по интегральной направленности восполнения подземных вод, чем в разделяющих их районах (Нижней и Средней Волги), где отмечается существенно асинхронный режим подземных вод. Также по мере удаления от Предуралья на восток коэффициенты корреляции связей режима подземного стока уменьшаются. Таким образом, как будто существует закономерность уменьшения степени связи режима подземных вод по мере увеличения расстояний между сравниваемыми точками, что отмечал Н.Ф. Дементьев [1969]. Однако с районом Забайкалья степень связи режима подземного стока вновь резко возрастает. Следовательно, в пределах довольно больших расстояний, даже в зонах синхронного режима подземных вод, могут встретиться чередующиеся регионы с более высокой и сравнительно низкой теснотой корреляционной связанности. Аналогичным образом и степень асинхронности близко расположенных районов (например, Предуралья и Северного Казахстана) значительно ниже, чем более удаленных районов (например, Предуралья с Магаданом и Камчаткой) (см. рис. 35).

Какого-либо четкого и закономерного перемещения экстремальных за многолетие уровней подземных вод со сдвигом во времени по территории СССР пока не установлено. Прослеживаются они, видимо, лишь на сравнительно ограниченных территориях в пределах относительно однородного по характеру интегральной направленности восполнения подземных вод региона. Так, по направлению от Ленинграда к Белоруссии и Москве как будто наблюдается постепенное изменение временных сдвигов в корреляционных связях уровней подземных вод (см. рис. 34). Однако южнее эта закономерность уже не улавливается. Наибольшая изменчивость в многолетнем режиме отмечается в направлении с севера на юг и значительно меньшие изменения фиксируются в направлении с запада на восток.

Для более детального и равномерного охвата территории СССР подобным анализом интегральная изменчивость режима подземных вод была изучена также по подземному стоку. Интегральные графики стока были составлены по всему 171 ряду и в схематическом виде представлены на рис. 36 (вкл.) В отличие от приведенных ранее данных о режиме уровней подземных вод эти данные характеризуют не обобщенные региональные, а частные особенности режима подземного стока, на которые, помимо географических или климатических факторов, большое влияние оказывают местные орографические, геологические и биолого-почвенные факторы. Эта карта была дополнена обобщенными региональными графиками уровней подземных вод. Разнообразие характера всех этих графиков для территории СССР оказалось весьма значительным. В целях обеспечения решения задачи нами для анализа были выбраны данные лишь последних 20 лет (с 1950 по 1970 г.) и предпринята попытка типизации характера многолетней изменчивости стока за это время. Это позволило выделить на территории СССР восемь принципиально различных видов

Виды №2	Типичный график асинхронности	Разновидности асинхронности	Типы асинхронности
1			I
2			
3			II
4			
5			III
6			
7			IV
8			

Р и с. 37. Схема видов, разновидностей и типов асинхронности режима подземного стока

многолетнего режима подземного стока, каждый из которых имеет от двух до шести разновидностей, отражающих как частные местные особенности формирования подземного стока, так и, по-видимому, переходные вариации режима от одного вида к другому на границах районов.

Эти виды многолетнего режима подземного стока показаны на рис. 37, из которого видно, что за последние 20 лет на территории СССР отмечалось четыре типа многолетнего режима подземного стока: I — постоянное увеличение (вид 1) или постоянное уменьшение (вид 2) расходов подземных вод в течение всего периода наблюдений; II — в течение первой части анализируемого периода отмечалось увеличение, а во второй — уменьшение подземного стока (вид 3) или наоборот (вид 4); III — двукратное увеличение и затем снижение подземного стока (вид 5) и противоположное ему по времени двукратное снижение и затем увеличение подземного стока (вид 6). Эти типы асинхронности наиболее часто встречаются как в чистом виде, так и в отдельных их вариациях, показанных на схеме, особенно виды 1—4,5. Редкий IV тип асинхронности, характеризующийся трехкратными подъемами и спадами кривых (вид 7), и противоположный ему вид 8, характеризующийся трехкратными снижениями и затем повышениями интегральных кривых подземного стока. Последний проявляется на Северо-Востоке СССР.

Характер территориального распределения отмеченных видов многолетнего режима подземного стока довольно сложный, но тем не менее можно отметить группировки ряда бассейнов, характеризующихся сравнительно одинаковым режимом подземного стока (см. рис. 36), а также наметить регионы с асинхронным его режимом.

Не облегчается положение с группированием районов по синхронности и асинхронности режима подземного стока при генерализации его многолетней изменчивости в виде временных диаграмм с отражением на них степени водности подземного стока в определенных градациях. Для этой цели нами были выделены маловодные годы (обеспеченность 66–100%), годы, близкие к норме (33–66%), и многоводные годы (обеспеченность 0–33%). Распределение лет различной водности подземного стока по территории СССР также весьма сложно (рис. 38, вкл.).

Дать генетическое обоснование той пестроте асинхронности режима подземных вод, которая отмечается на территории СССР, пока трудно. Эти вопросы еще должны исследоваться с учетом достижений смежных отраслей знаний в области формирования водных ресурсов в целом, и прежде всего в метеорологии и гидрологии. Возможно, выявленная асинхронность случайного характера и за другой промежуток времени будет установлен иной ее характер и во времени и в пространстве. И это также должно быть предметом дальнейшего изучения и соответствующих доказательств.

Колебаниями третьего порядка, способными определить синхронность и асинхронность режима подземных вод территории СССР, служат различные короткопериодные (менее 10 лет) циклические колебания, вскрытые как в уровнях подземных вод, так и в подземном стоке. Приведенная на карте (см. рис. 38) цикличность показывает, что строгой закономерности в региональной ее приуроченности не прослеживается в связи с существенной зависимостью проявления цикличности от местных гидрогеологических условий (инерционности водоносных горизонтов). Однако ранее нами отмечалось наличие некоторой тенденции к преобладанию в отдельных районах циклов определенной длины. Так, отмечалась тенденция к преобладанию 2-летних циклов в режиме подземных вод и подземного стока на Европейской части СССР, в Западной Сибири; 3-летних – в Восточной Сибири и Средней Азии; 4-летних – в Средней Азии и на Дальнем Востоке; 5–6-летних – в Прибалтике и Прикаспии; 10–16-летних – Волго-Уральской области и Центрально-Черноземной полосе и т.д. Все это неизбежно должно сказаться на закономерностях синхронности и асинхронности режима уровней подземных вод и подземного стока и должно приниматься во внимание при районировании территорий по этим показателям.

Более того, приведенные нами расчеты фаз цикличности при периодограммном анализе колебаний уровней подземных вод и подземного стока показали, что преобладающая в структуре рядов наблюдений 2–3-, 5–6- и 10–12-летняя цикличность в различных районах страны находится на один и тот же промежуток времени в различных фазах. Так, для квазидвухлетней цикличности наиболее характерны фазы, близкие к  $+90^\circ$  и  $-90^\circ$ , т.е. эти колебания в разных районах СССР прямо асинфазны. Однако в тех случаях, когда эта цикличность ближе к 3-летней, разнообразие фаз по территории СССР на один и тот же момент времени оказывается более значительным (рис. 39).

Группировка положительных и отрицательных значений фаз позволяет вскрыть интересную закономерность прохождения данной цикличности по территории СССР. Зоны с положительными и отрицательными фазами



чередуются, последовательно сменяясь в направлении с запада на восток. Лишь в Европейской части СССР, где режим подземных вод формируется одновременно под влиянием западного и южного переноса влаги, такое строгое чередование зон синхронного и асинхронного режима подземных вод усложняется.

Аналогично чередование по территории СССР зон и с 5–6-летней цикличностью (рис. 40). Однако зоны с положительными и отрицательными фазами колебаний в данном случае более обширны в пространстве. Еще шире зоны синхронного и асинхронного режима подземных вод отмечаются по 10–12-летней цикличности (рис. 41, а, б).

Все эти зоны передвигаются во времени с запада на восток и через интервал времени, равный половине цикла, происходит смена фазы цикличности с положительной на отрицательную, т.е. многоводные годы сменяются маловодными. Конфигурация расположения этих зон сохраняется такой же, как и при противоположной фазе (см. рис. 41, а, б).

Ограниченность выполненных расчетов не позволяет районировать территорию СССР по распределению фаз основных циклов с достаточно высокой детальностью. Поэтому представленные на рис. 39–41 контуры зон положительных и отрицательных фаз основных циклов, конечно, весьма условны. Вместе с тем они наглядно показывают характер процесса пространственно-временной многолетней изменчивости подземного стока. Из приведенных карт видно, что зоны синхронности и асинхронности по разным видам цикличности могут не совпадать, а, следовательно, амплитуды колебаний в положительные и отрицательные фазы разных циклов могут складываться и вычитаться, что и определяет сложность режима подземных вод и видимую его незакономерность. Следует отметить также, что характер данного процесса усложняется еще и особенностями гидрогеологических условий различных районов страны, так как даже на локальных территориях, как уже подчеркивалось ранее, в зависимости от глубин залегания водоносных горизонтов и скоростей их водообмена циклы могут находиться в противофазе.

Выявление закономерности в характере распределения фаз основных циклов по территории СССР, помимо ограниченности данных, осложнено еще и незначительной весовой ролью циклических составляющих в общем размахе многолетних колебаний. Последнее обстоятельство определяет низкую достоверность и самой цикличности, и расчетов ее фаз. Однако в тех случаях, когда вклад отдельных циклов в общий размах колебаний значителен, отмеченная изменчивость прохождения фаз циклов по территории СССР может быть весьма существенным фактором в определении асинхронности многолетней изменчивости режима подземных вод, так как асинхронность цикличности должна учитываться как один из составных элементов при определении существующей общей асинхронности режима подземных вод.

Р и с. 39. Распределение зон с положительными и отрицательными фазами 2–3-летних колебаний подземного стока на территории СССР в 1954 г.

Цифры на карте: числитель — амплитуда 2–3-летних колебаний подземного стока в  $\text{м}^3/\text{с}$ , знаменатель — фаза данной цикличности в градусах; 1 — зона положительных фаз; 2 — зона отрицательных фаз



Наконец, к колебаниям четвертого порядка, в которых фиксируется явно выраженная асинхронность режима подземных вод, относятся сезонные годовые колебания уровней подземных вод и подземного стока. Как уже отмечалось ранее, при картировании сезонных прогнозов режима уровней подземных вод ежегодно фиксировались изменения площадей с различными отклонениями прогнозируемых уровней (минимальных, максимальных и среднегодовых) от их среднегодовых норм. Четких закономерностей при этом картировании не проявлялось, так как наблюдаемые изменения определялись в основном метеорологической обстановкой, закономерности многолетней изменчивости которой, к сожалению, пока еще не изучены, а в последние годы нередко характеризуются синоптиками вообще как аномальные.

Для исследования возможных закономерностей изменчивости питания подземных вод в региональном плане по отдельным годам и за многолетие нами были построены ретроспективные карты режима уровней подземных вод Европейской части СССР и подземного стока Сибири и Дальнего Востока соответственно за 11 и 9 лет подряд. Для уровней подземных вод был выбран период с 1960 по 1970 г. включительно, а по подземному стоку — за период с 1962 по 1970 г. Для достижения сопоставимости картируемых характеристик и уровни и подземный сток были выражены в процентах обеспеченности.

Для исключения субъективности в построении карт за счет условности возможного проведения контуров различной обеспеченности, а также для достижения сопоставимости карт и автоматизации этой довольно трудоемкой работы последние строились при помощи ЭВМ. Использование данного приема картирования определено и объективными причинами. Первая из них — неравномерность охвата изучаемых регионов наблюдениями за режимом подземных вод. Несмотря на создание в стране опорной наблюдательной сети, развита она все еще в очень ограниченном числе наиболее обжитых районов. В таких условиях экстраполяция данных режима или его прогнозов со сравнительно изученных участков на неизученные или менее изученные не может быть объективной, даже если подобная экстраполяция делается на территорию с хорошо известными режимобразующими условиями. Другая причина связана с наличием значительного числа наблюдательных точек с аномальным режимом подземных вод, не свойственным окружающим территориям. Это, как уже указывалось, может быть определено узко локальными естественными и искусственными воздействиями на подземные воды, техническим состоянием наблюдательных скважин, браком в производстве замеров и т.д. В итоге по вынесенным на карту результатам фактических наблюдений при таком мелкомасштабном обзорном картировании субъективность картирования неизбежна, и поэтому два даже очень опытных гидрогеолога составят почти всегда две различные карты.

Р и с. 40. Распределение зон с положительными и отрицательными фазами 5–6-летних колебаний подземного стока на территории СССР в 1954 г.

Цифры на карте: числитель — амплитуда 5–6-летних колебаний подземного стока в  $\text{м}^3/\text{с}$ , знаменатель — фаза данной цикличности в градусах; 1 — зона положительных фаз; 2 — зона отрицательных фаз

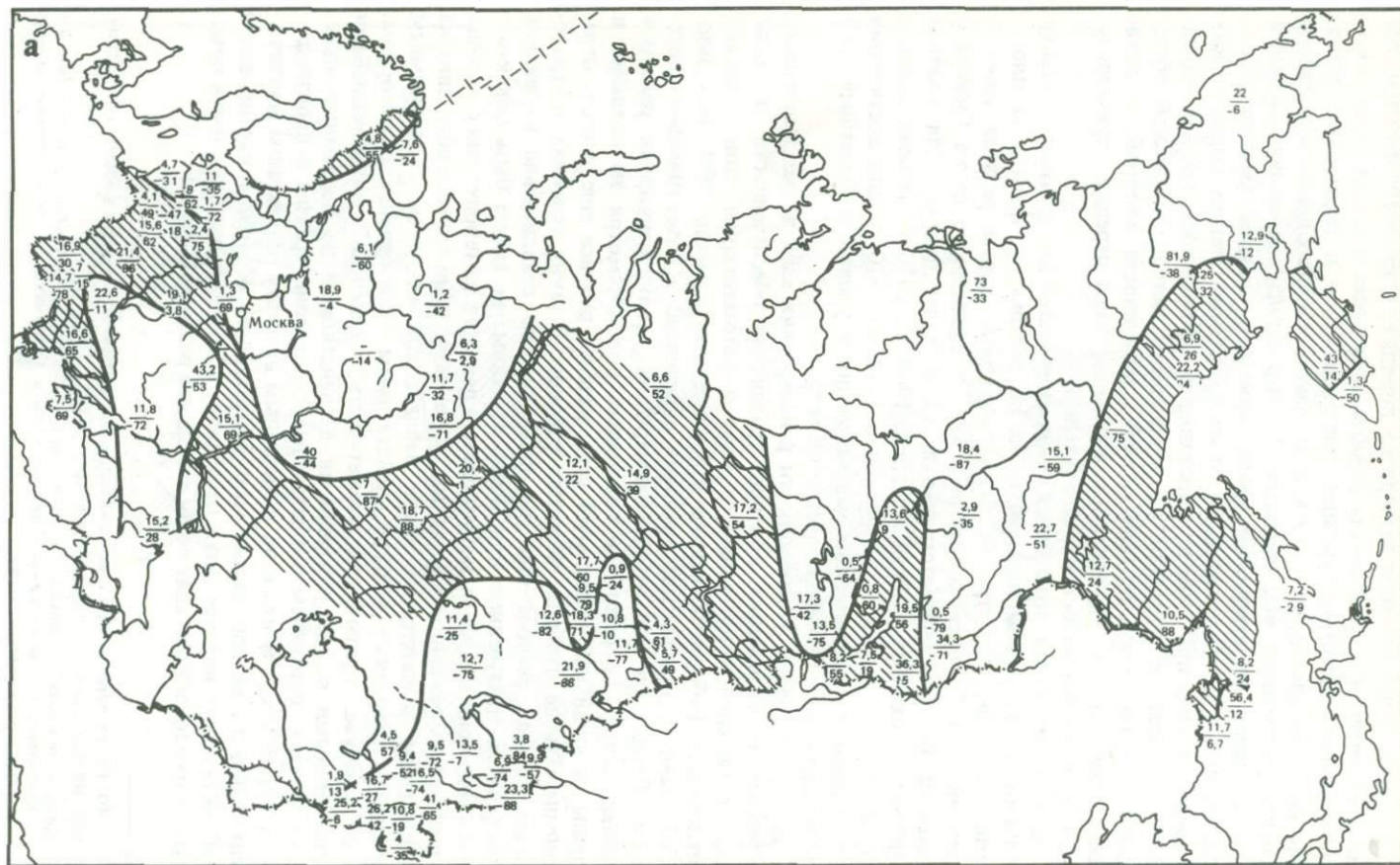


Рис. 41а

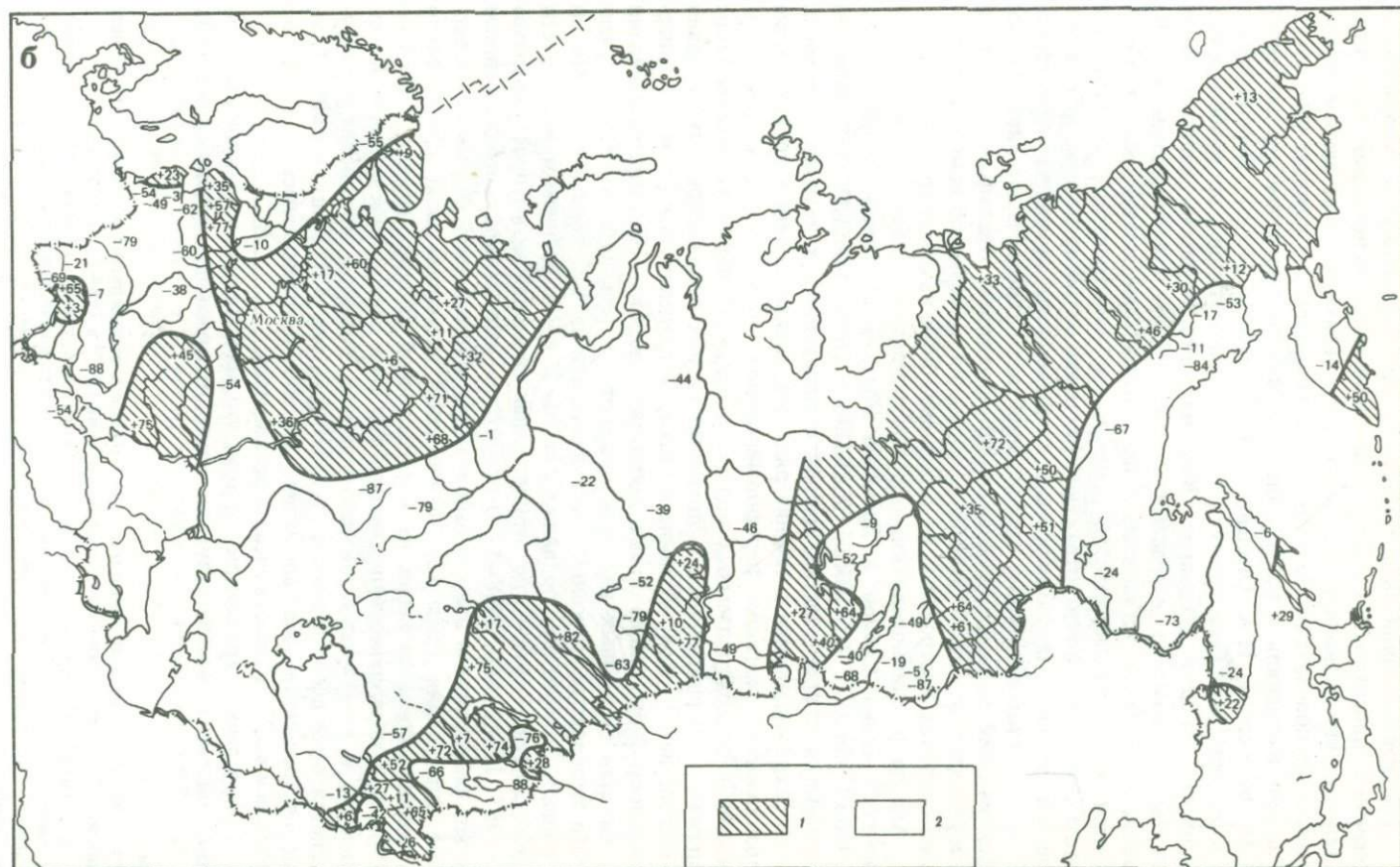


Рис. 416

Для картирования был выбран метод аппроксимации картируемых значений поверхностью тренда, определяемого полиномами различных степеней, что позволяет картировать экспериментальные данные, произвольно расположенные на карте, а не заложенные в каждом узле сетки. Расчеты выполнялись на машине БЭСМ-6 по программе, составленной Г.М. Великиной, Н.А. Огильви и М.С. Крассом [1976]. Первоначально расчет ряда карт был произведен в несколько этапов с постепенным увеличением степени полинома. Как известно, точность аппроксимации карты закономерно возрастает с увеличением степени полинома. На этом этапе было установлено, что оптимальная аппроксимация достигается при полиноме шестой степени, так как расчетные контуры при этом достаточно точно отражают фактическое распределение обеспеченностей уровней подземных вод и подземного стока по территории. С другой стороны, они в определенной мере генерализуют картируемый фактический материал, исключая или сглаживая отдельные частности и несущественные, часто случайные, аномалии, которые обычно выделяются уже на картах, построенных по полиномам более высоких степеней.

Анализ рассчитанных таким образом трендовых поверхностей для подземного стока Сибири и Дальнего Востока по годам (с 1962-го по 1970-й) показал, что режим подземного стока довольно динамичен во времени и в пространстве. Наряду с аномалиями в питании подземных вод, сохраняющимися в течение ряда лет, можно отметить происходящие практически ежегодно переформирования общей картины обеспеченностей расходов подземных вод по площади. Особенно устойчивы такие аномалии, выражающиеся в повышенном или пониженном относительно многолетней нормы подземном стоке, в пределах платформ, где инерционность подземного стока достаточно высока. Некоторые аномалии в питании подземных вод прослеживаются в течение почти всего изученного периода, то несколько затухиваясь на 1–2 года и смещаясь по площади, то отчетливо проявляясь вновь. К таким районам можно отнести Центральную Якутию, где отрицательная аномалия четко прослеживалась в 1963, 1964, 1966, 1968–1970 гг., что, видимо, связано с преобладанием в это десятилетие в данном районе одной определенной формы атмосферной циркуляции (рис. 42). Аналогичная аномалия также сравнительно устойчиво прослеживалась на юге Восточной Сибири, начиная с 1963 по 1969 г., с периодическими смещениями то к западу, то к востоку. В горных же и приморских районах подобные аномалии возникают и разрушаются чаще всего в течение 1–2 лет (см. рис. 42). Лишь в районе Приморья положительная аномалия хорошо прослеживалась с 1962 по 1966 г. и в 1968 г., то сужаясь, то расширяясь.

Обзор этих карт говорит о том, что многолетняя изменчивость питания подземных вод не результат каких-то случайных стечений локальных

Рис. 41. Распределение зон с положительными и отрицательными фазами 10–12-летних колебаний подземного стока на территории СССР в 1954 г. и в 1959 г.

$a$  — 1954 г. (Цифры на карте: числитель — амплитуда 10–12-летних колебаний подземного стока в  $\text{м}^3/\text{с}$ , знаменатель — фаза данной цикличности в градусах);  $b$  — 1959 г. (цифра — фаза данной цикличности в градусах); 1 — зона положительных фаз; 2 — зона отрицательных фаз.

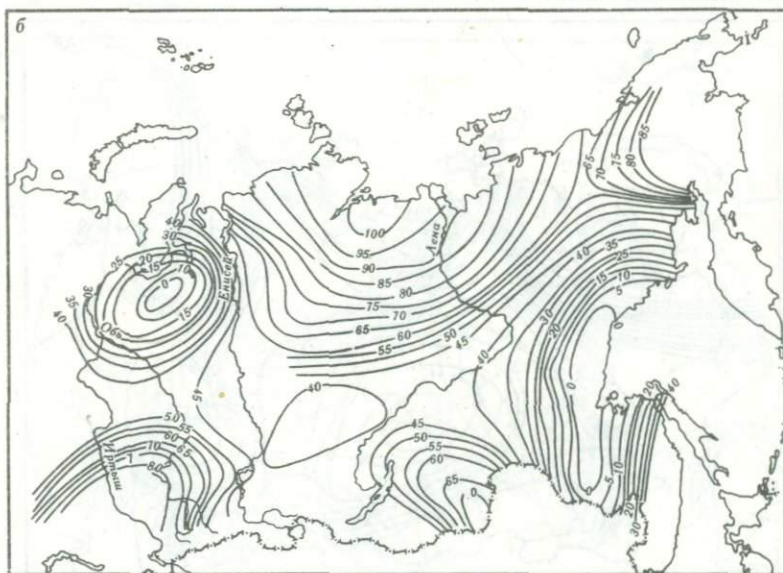
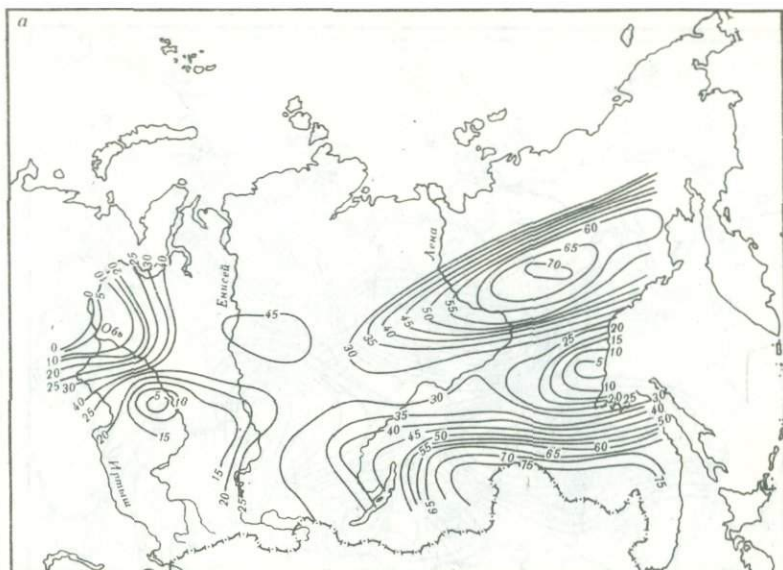


Рис. 42. Схемы распределения величин подземного стока в процентах обеспеченности по территории Сибири и Дальнего Востока за период 1962–1970 гг.

*a* – 1962 г.; *б* – 1963 г.; *в* – 1964 г.; *г* – 1965 г.; *д* – 1966 г.; *е* – 1967 г.; *ж* – 1968 г.; *з* – 1969 г.; *и* – 1970 г.;

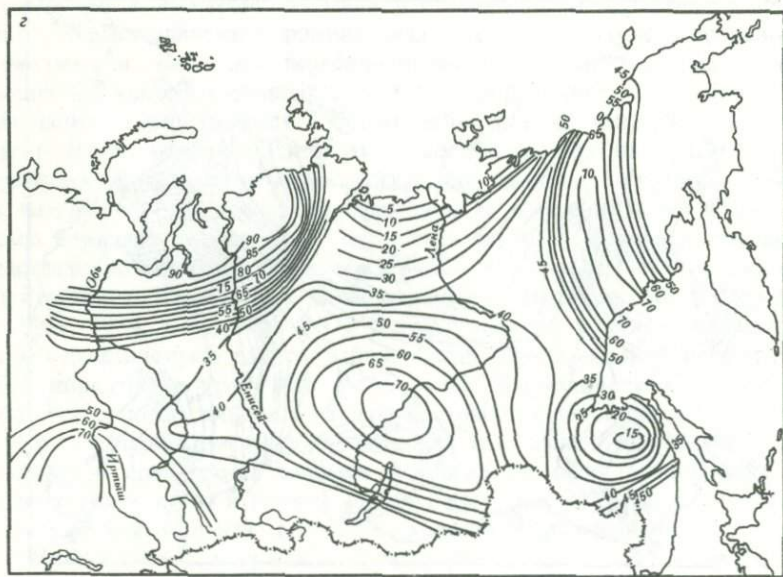
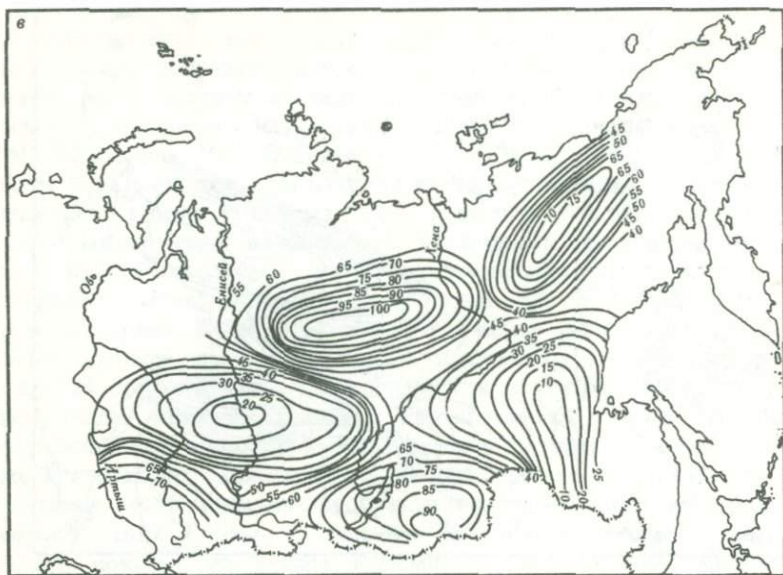


Рис. 42 (продолжение)

обстоятельств, а результат крупномасштабных глобальных процессов. Об этом свидетельствует тот факт, что наблюдающиеся аномалии в питании подземных вод охватывают, как правило, огромные территории. Следовательно, изучение и прогноз этих изменений должны базироваться на выявлении связей формирования питания подземных вод с глобальными геофизическими процессами (атмосферной циркуляцией, барическими полями Земли, взаимодействием и теплообменом суши и

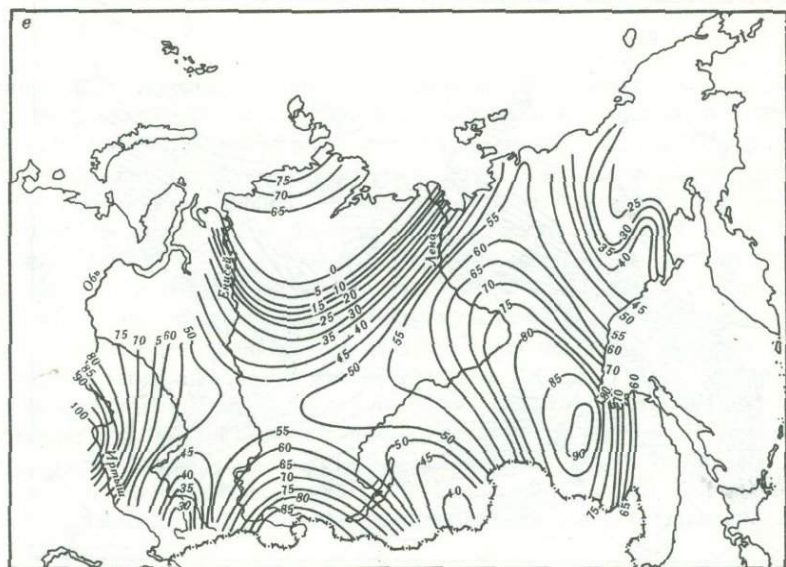
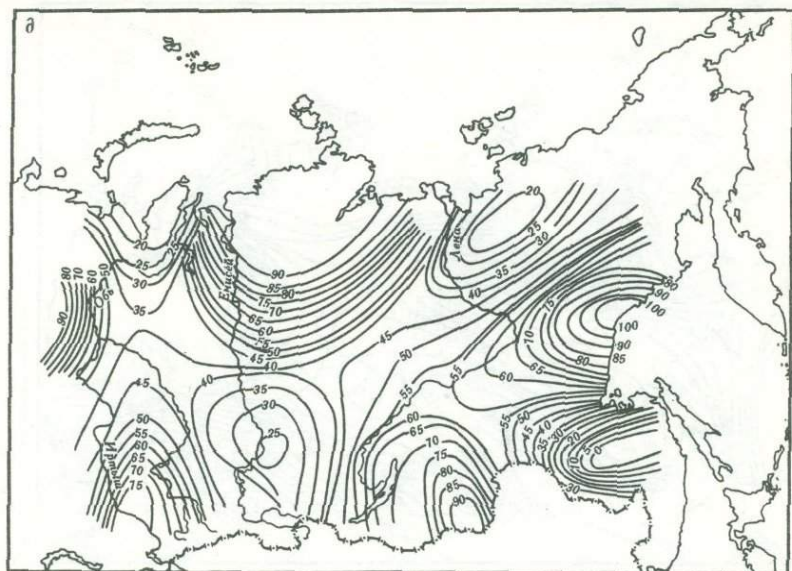


Рис. 42 (продолжение)

океана и т.п.). С другой стороны, каких-либо явных и постоянных во времени границ территорий с синхронным и асинхронным режимом подземных вод не выявляется. Переформирование аномальных зон осуществляется по территории в течение ряда лет постепенно (см. рис. 42). При этом региональная направленность этого переформирования подчинена, видимо, также глобальным процессам, определяющим обмен тепла и влаги на Земле. Существенна при этом роль и различных слу-

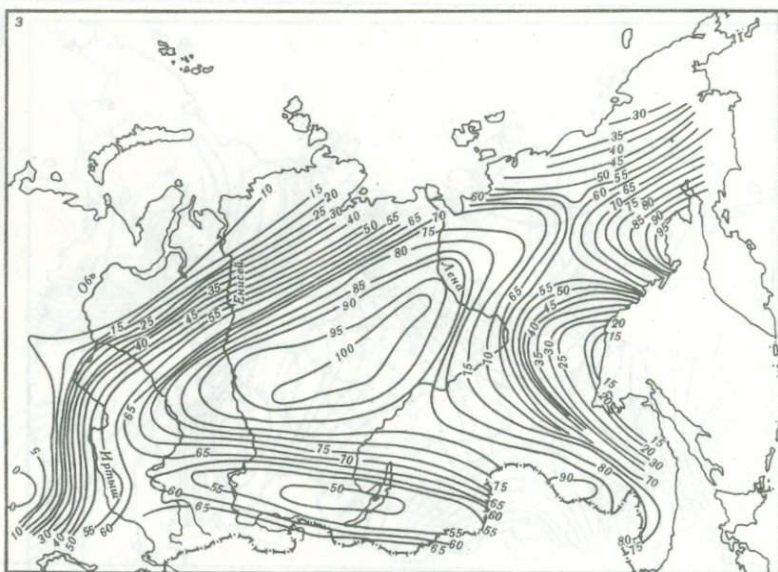
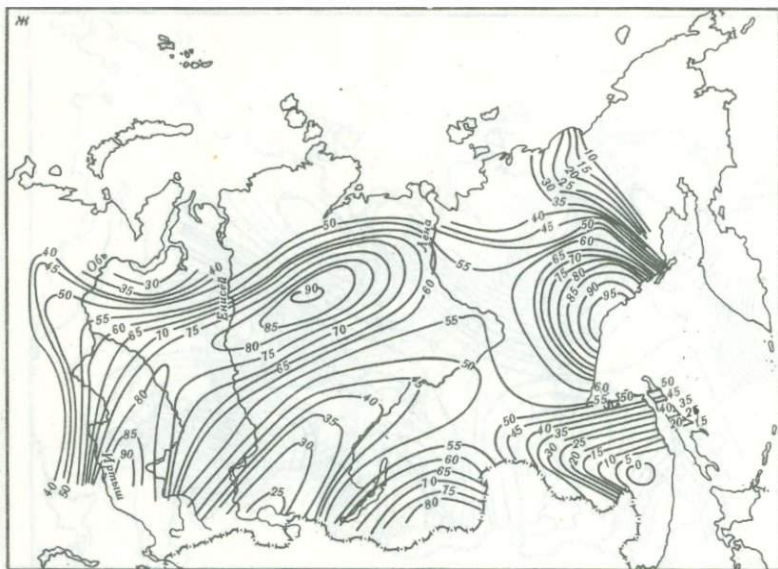
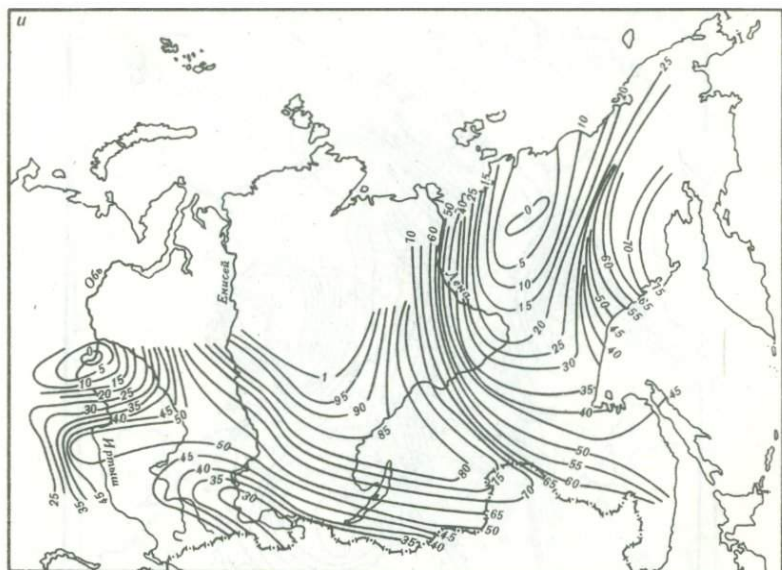


Рис. 42 (продолжение)

чайных процессов. Однако этот вопрос требует еще дополнительного обоснования и изучения на большем фактическом материале и, в частности, на подобных картах, построенных для всей территории СССР за большой промежуток времени.

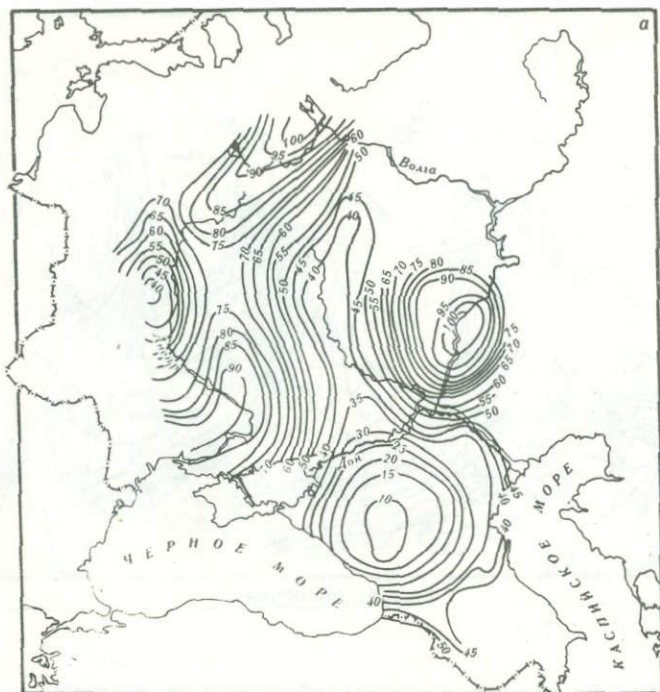
Сезонные изменения уровней подземных вод картировались за 11 лет (с 1960 по 1970 г.) для Европейской территории СССР, где имеется



Р и с. 42 (окончание)

сравнительно большое количество наблюдений за режимом подземных вод. Результаты трендового анализа подтвердили выводы, полученные при исследовании многолетнего режима подземного стока. Поверхность грунтовых вод переформируется почти ежегодно. Положительные и отрицательные аномалии неожиданно создаются и затем в течение 2–3 лет постепенно как бы растекаются, часто сдвигаясь в смежные районы. Наиболее устойчивы во времени аномалии в юго-восточных районах данной территории и менее стабильны в западных и северо-западных, что вполне объяснимо климатическими особенностями данных регионов, т.е. степенью воздействия Атлантики на погодные условия. Этим обстоятельством, видимо, можно объяснить и тот факт, что установленная кросскорреляцией асинхронность режима уровней грунтовых вод северо-западных и юго-восточных районов Европейской части СССР прослеживается нерегулярно. Так, четкая асинхронность режима подземных вод в этих регионах отмечалась в 1961–1965 гг. и в 1970 г., а в 1966 и 1969 гг. режим подземных вод этих районов практически был однотипным по степени водности.

Четких закономерностей в перемещениях аномалий по данной территории не улавливается. Например, положительная аномалия в 1960 г. проявилась рельефно только на всем юго-юго-востоке ЕТС в Предкавказье (рис. 43) при преобладании на всей территории уровней ниже нормы. В 1961 г. эта аномалия значительно сузилась, но к ней присоединилась вновь сформировавшаяся аномалия в центральных районах ЕТС. В 1962 г. первая аномалия сместилась на северо-восток, в Среднее Поволжье, а вторая — несколько на северо-запад, в Прибалтику. В 1963 и 1964 гг. первая сохранилась практически на том же месте в Среднем



Р и с. 43. Схемы распределения уровней подземных вод в процентах обеспеченности по территории ЕТС за период 1960–1970 гг.

а – 1960 г.; б – 1961 г.; в – 1962 г.; г – 1963 г.; д – 1964 г.; е – 1965 г.; ж – 1966 г.; з – 1967 г.; и – 1968 г.; к – 1969 г.; л – 1970 г.

Поволжье и бассейне Дона, а вторая сначала локализовалась в Прибалтике, а затем либо исчезла, либо сместилась в Польшу. Затем первая аномалия начала смещаться на юго-запад, сначала на Восточную Украину (1965–1966 гг.), а затем в Западную Украину (1967–1968 гг.) и в Белоруссию (1969 г.), после чего она вновь переместилась в Центральную Украину (1970 г.). Как видно, во всех этих "блужданиях" аномалий не прослеживается какого-то закона. Повышенная инерционность уровней грунтовых вод по сравнению с подземным стоком проявилась и в данных картах. Так, отрицательная аномалия, отмеченная на северо-востоке Европейской территории СССР уже в 1960 г., просуществовала почти весь период изучения (11 лет), то несколько смещаясь в центральные районы (1963–1965 гг.), то в сторону Предуралья – Среднего Поволжья (1966–1969 гг.). Обзор этих карт позволяет сделать ряд выводов о характере ежегодной изменчивости в режиме подземных вод. Ежегодные изменения в восполнении запасов подземных вод происходят постепенно во времени и в пространстве. Сформировавшиеся положительные и отрицательные аномалии существуют, как правило, не менее 2–3 лет, постоянно перемещаясь по территории. Постоянных районов асинхронного режима подземных вод выделить нельзя. Но как будто намечаются зоны противоположной направленности в питании подземных вод по окраинным частям Европейской

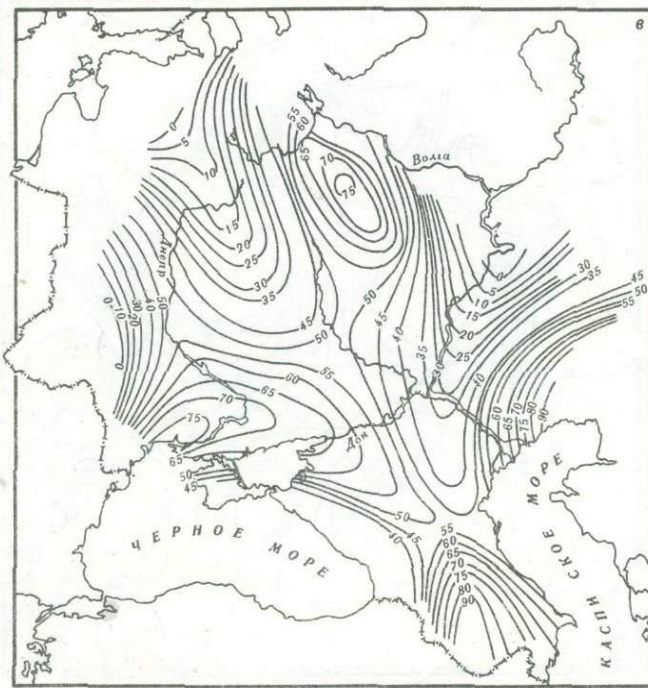
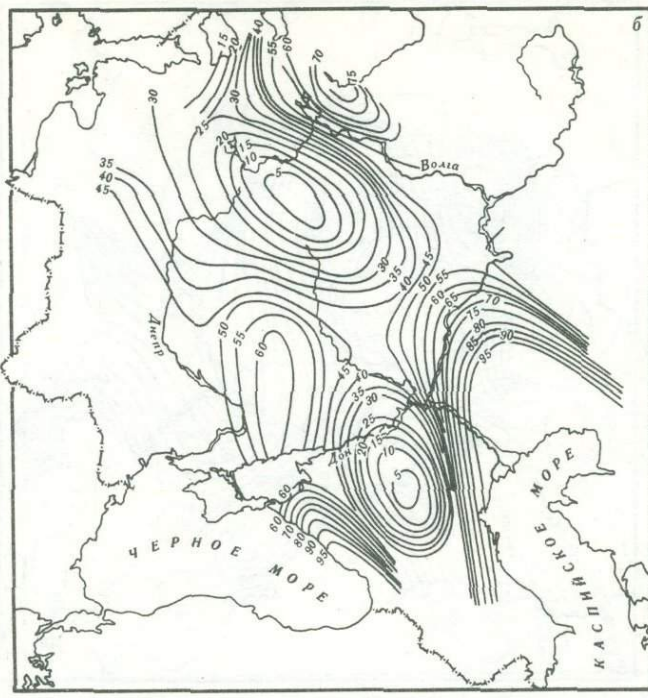


Рис. 43 (продолжение)



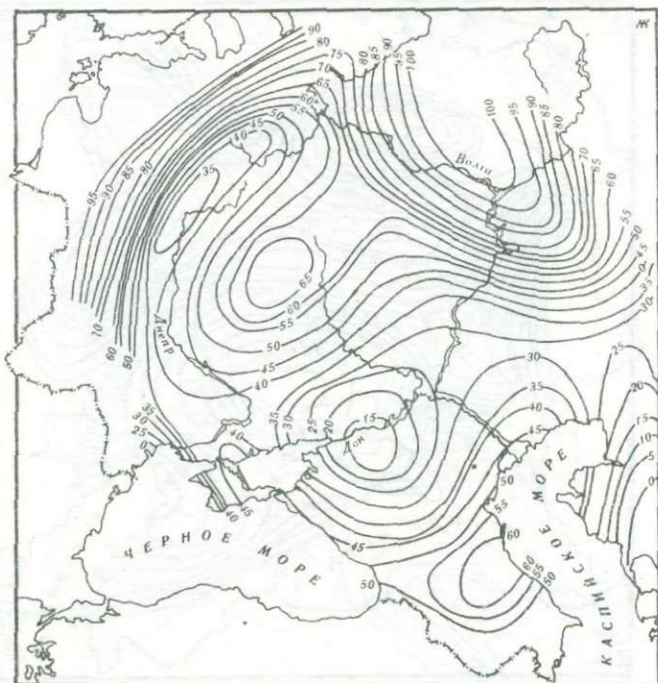
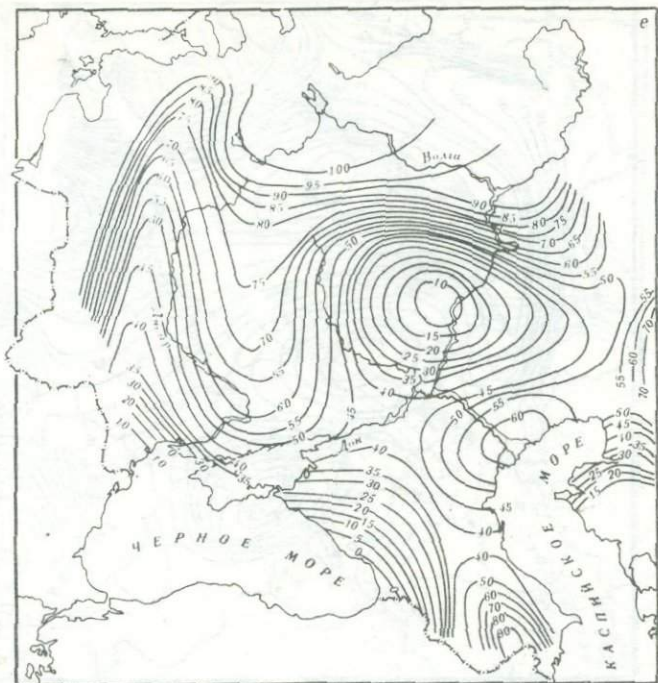


Рис. 43 (продолжение)

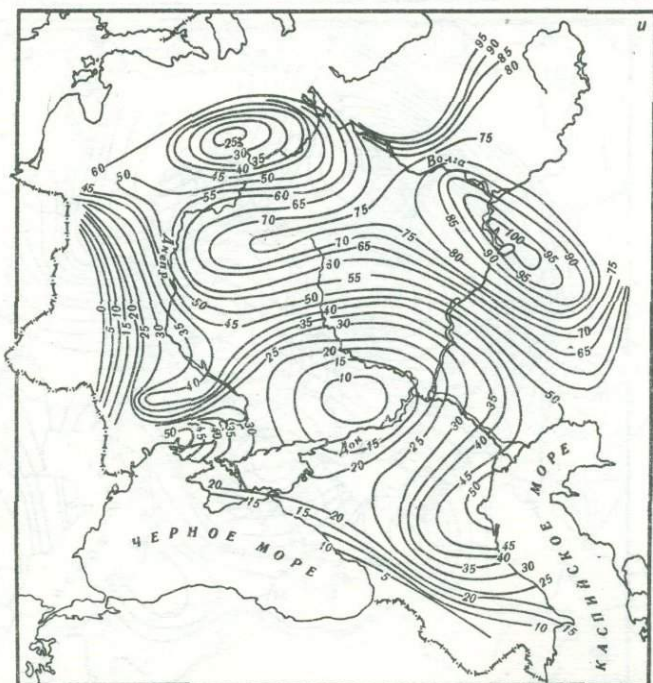
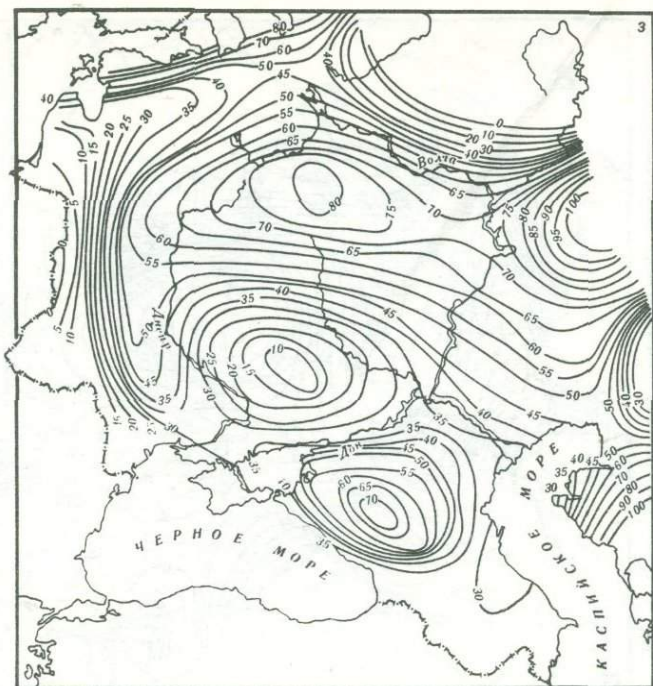


Рис. 43 (продолжение)

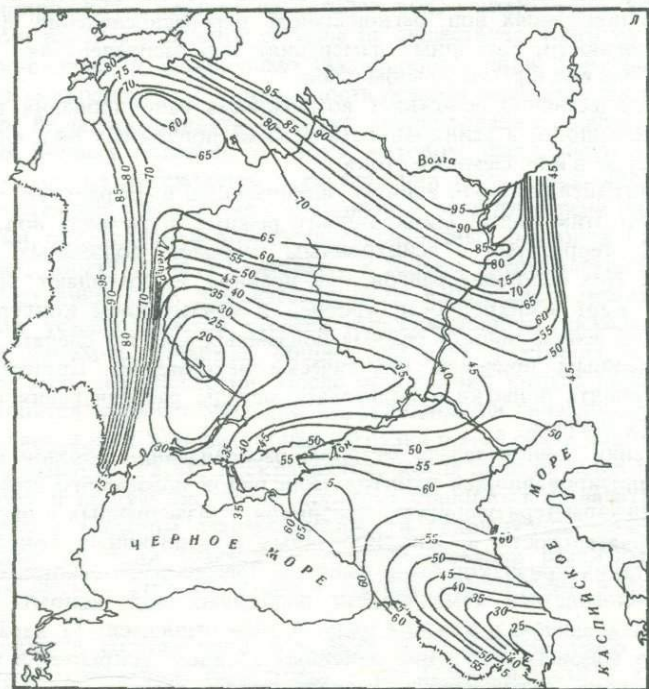
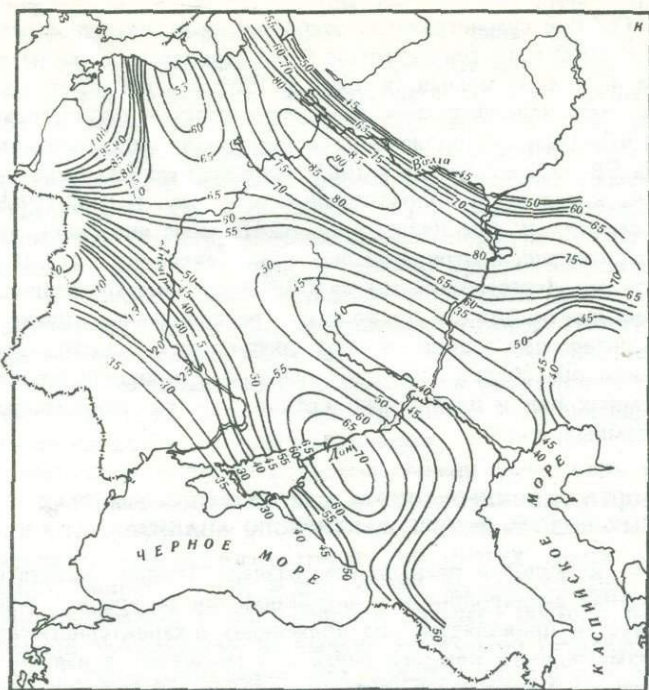


Рис. 43 (окончание)

территории СССР с симметричным расположением аномалий различного знака. Так, в 1960 г. на северо-западе была отрицательная аномалия, а на юго-востоке — положительная, в 1961 и 1962 гг., наоборот, на северо-западе отмечалась положительная, а на юго-востоке — отрицательная аномалия. В 1963–1964 гг. происходит постепенная смена оси симметрии с СЗ–ЮВ на СВ–ЮЗ, и поэтому в 1965–1966 гг. отрицательные аномалии тяготеют уже к северу, а положительные — к югу. В 1967–1969 гг. ось симметрии сместилась еще далее, и положительные аномалии отмечаются уже на юго-западе, а отрицательные — на северо-востоке. В 1970 г. вновь наметилась перестройка оси на СЗ–ЮВ, т.е. как будто цикл многолетней изменчивости, равный 11 годам, в региональном плане завершился. Эта интересная закономерность требует дальнейшего подтверждения, так как она может послужит основой при прогнозировании режима подземных вод и планировании рационального использования ресурсов подземных вод.

### ОСОБЕННОСТИ РАЙОНИРОВАНИЯ И КАРТИРОВАНИЯ РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ОСНОВЕ ФАКТОРНОГО АНАЛИЗА

Суммируя сказанное в предыдущем разделе, можно констатировать, что региональная асинхронность в формировании ресурсов подземных вод существует и проявляется она по-разному в характеристиках многолетней их изменчивости каждого ранга или масштаба, а именно: в многолетних трендах, многолетней интегральной направленности восполнения запасов подземных вод, региональном перераспределении фаз различной цикличности, ежегодных изменениях перераспределения питания подземных вод в региональном плане.

Все это существенно осложняет возможность районирования территории по синхронности и асинхронности режима подземных вод, формирования их ресурсов и подземного стока.

Можно ли найти какую-то единую обобщающую интегральную характеристику всем этим видам асинхронности режима подземных вод, учитывая то, что территории с асинхронным режимом подземных вод по каждому из этих основных рангов, как правило, не совпадают? Простым наложением карт асинхронности уровней и увязыванием контуров различных видов асинхронности режима подземных вод это сделать трудно, а по изложенным причинам практически невозможно. Поэтому нами была предпринята попытка использовать методы распознавания образов и факторного анализа.

При решении данной задачи методом распознавания образов по каждому из анализировавшихся пунктов (или рядов подземного стока) был составлен ряд характеризующих его признаков, размещенных в определенной последовательности и закодированных в однотипных показателях. В качестве таких признаков были выбраны прежде всего основные характеристики многолетней изменчивости подземных вод, вскрытые предварительным анализом в каждом ряду. К ним относятся: 1) характеристика темпов годовых изменений линейных трендов, вскрытых в рядах с учетом их знака, отражающая направленность тренда (см. рис. 12); 2) вид схематизированной кривой многолетней изменчивости подзем-

ного стока за последние 20 лет (см. рис. 37); 3) степень взаимосвязанности или автокоррелированности членов ряда ( $R_{\tau=1}$ ), отражающей степень инерционности водоносного горизонта или зависимости величин подземного стока каждого последующего года от предыдущего (см. рис. 25). Помимо этого, дополнительно были внесены признаки, косвенно отражающие геологическую и гидрогеологическую обстановку каждого бассейна: а) величины минимальных модулей подземного стока; б) коэффициенты вариации рядов ( $C_v$ ), характеризующие косвенно фильтрационные свойства водовмещающих пород и интенсивность водообмена водоносных горизонтов, а также в) приуроченность водосборного бассейна к определенной тектонической области (платформы, шиты, гесинклинальные области), в пределах которых могут проявиться разнонаправленные неотектонические движения (погружение или подъем земной коры), которые могут отразиться в многолетней изменчивости подземного стока, т.е. в его трендах; г) длина установленных в каждом ряду подземного стока достоверных циклов.

Суть метода заключается в расчете степени связанности или близости каждого составленного таким образом ряда признаков с другими такими рядами и в группировании этих рядов по степени их близости. Особенности применения этого метода рассмотрены во многих работах [Надь, 1968; Скляренко, Смирнов, 1974; и др.]. Расчет данным методом, проведенный по рядам подземного стока Сибири и Дальнего Востока, по программе, составленной В.А. Жуком, не выявил каких-либо группировок анализировавшихся рядов наблюдений. Это свидетельствует о том, что региональной синхронности режима подземных вод, учитывающей все указанные признаки режима в данном регионе не существует. Поэтому данный процесс, по-видимому, необходимо анализировать лишь с учетом каждого из уровней синхронности и асинхронности режима последовательно.

Нами была предпринята попытка районирования особенностей многолетнего режима подземного стока методом факторного анализа. Суть данного метода заключается в расчленении имеющейся общей дисперсии анализируемого процесса на составляющие этой дисперсии или факторные нагрузки, определяемые воздействием различных факторов. Сами факторы в расчете могут и не участвовать, а только предполагаться. В расчетах участвуют лишь сами фактические ряды наблюдений, между каждым из которых устанавливается степень корреляционной связанности, определяемая каким-то главным, общим для всех фактором, и оценивается весовая роль его дисперсии. После исключения вклада первого фактора производится пересчет матрицы корреляционной связанности всех рядов и выделяется роль или факторная нагрузка в этой связи какого-то второго по весу фактора. Расчет прекращается, когда доли вкладов последующих факторов в общую дисперсию процесса становятся незначительными. Параллельно с расчетом взаимосвязанности рядов осуществляется их группирование по роли участия в их формировании различных факторов. Математическая сторона данного метода рассмотрена в работе Окуня [1974].

Апробация составленной В.А. Жуком программы была осуществлена сначала на небольшой территории — по Заречной части г. Горького, где имеется большое количество наблюдательных скважин. Расчет выпол-

нялся по среднемесячным значениям уровней подземных вод за 5 лет, охватывающих многоводные и маловодные периоды. Предварительно по трем створам были построены графики зависимостей амплитуд сезонных колебаний уровней грунтовых вод для маловодных, многоводных и средних по водности лет от расстояния наблюдательной скважины до Оки и Волги и определена тем самым зона возможного их подпорного влияния на режим подземных вод, которая и служила контролем правильности расчетов методом факторного анализа (рис. 44).

В результате расчетов было установлено, что весомой вклад первого главного фактора в общую дисперсию колебаний уровней грунтовых вод на данной территории составляет 54,5, второго — 20,5 и третьего по значимости фактора — уже 8,7%. Последующий анализ условий формирования режима подземных вод данной территории показал, что он формируется под воздействием главным образом двух основных факторов — реки и атмосферных осадков. Это подтверждается и диаграммой группировки точек, где видны два четких изолированных облака точек, т.е. две группы скважин. Анализ этих групп точек показал, что в одну из них попали все скважины с четко выраженным приречным видом режима (с большими сезонными амплитудами уровней), а в другую — скважины, приуроченные к междуречью. Исключение составили две обособленные скважины — 520 и 491, в которых, как выяснилось, режим подземных вод в пределах выбранных для анализа лет был существенно нарушен хозяйственной деятельностью человека. Таким образом, на данной территории можно выделить только два вида естественного режима грунтовых вод (приречный и междуречный) и один нарушенный, в то время как ранее при районировании данной территории по видам режима грунтовых вод выделялось четыре вида (приречный, террасовый, склоновый и междуречный).

Данные исследования показали эффективность применения факторного анализа для целей районирования, выбраковки аномальных значений в исследуемых выборках и определения числа факторов, необходимых для анализа и прогнозов режима подземных вод и подземного стока.

Применение факторного анализа для районирования подземного стока по особенностям его многолетнего режима по территории СССР, так же как и метода распознавания образов не дало положительных результатов. Анализируемые ряды наблюдений не объединялись в группы, и в них не выделялись воздействия каких-то общих для всех регионов факторов, существенно определяющих их режим. И в этом, видимо, есть физический смысл, так как главным фактором во всех этих рядах стока являются атмосферные осадки, а они на каждой территории различны, и корреляционные связи между ними для таких больших территорий слишком слабые. Не улучшила существенно результаты и некоторая генерализация анализируемых рядов, которые были представлены в пятибалльной системе по степени их обеспеченности. Для этого все ряды были представлены не в абсолютных величинах подземного стока, а в пяти градациях их обеспеченностей по каждому году: 1 — обеспеченность очень высокая — подземный сток значительно ниже нормы —  $P > 90\%$ ; 2 — сток ниже нормы (60–90%); 3 — сток близок к норме

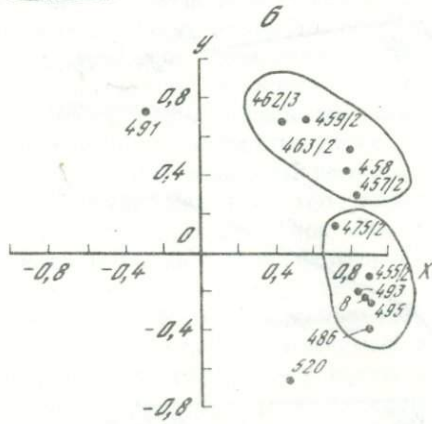
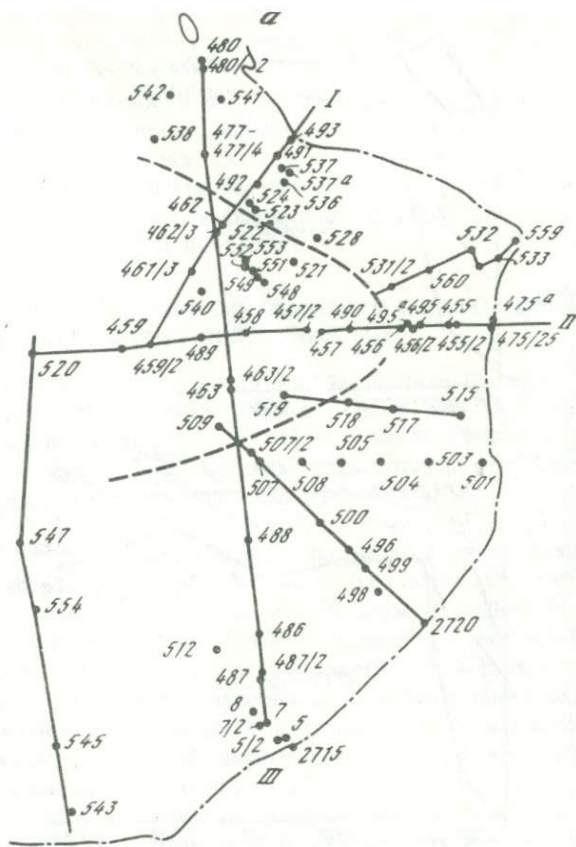
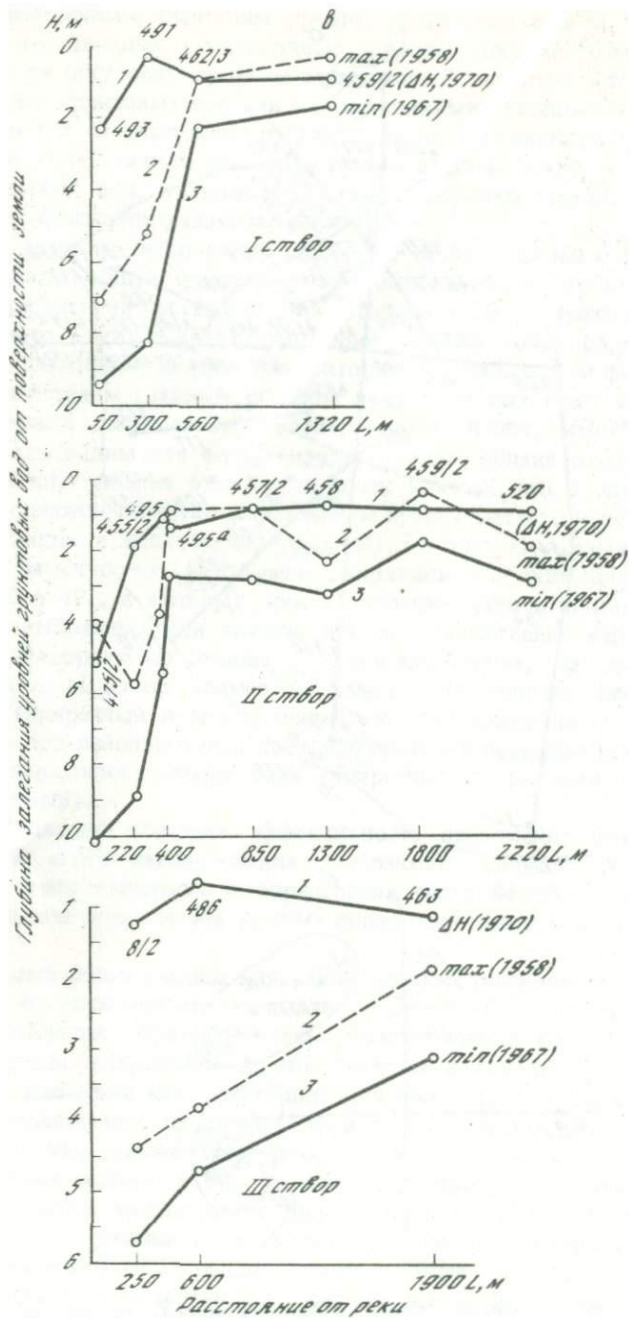


Рис. 44. Схема размещения скважин в Заречной части г. Горького (а), группировка скважин факторным анализом (б) и графики зависимости амплитуд колебаний уровней грунтовых вод от расстояния до реки (в) для средних (1), многолетних (2) и маловодных (3) лет



Р и с. 44. (окончание)

(40–60%); 4 – сток выше нормы (40–10%) и 5 – обеспеченность очень невысокая – сток много выше нормы ( $P < 10\%$ ). Многолетняя изменчивость подземного стока в таких рядах, естественно, резко уменьшилась, так как исключились частные особенности формирования подземных вод в каждом индивидуальном бассейне и более проявились региональные особенности стока. Но и в этом случае детального районирования многолетнего режима подземного стока не получилось.

По-видимому, применение факторного анализа для подобных крупных региональных обобщений неэффективно.

#### РАЙОНИРОВАНИЕ СССР ПО СИНХРОННОСТИ И АСИНХРОННОСТИ МНОГОЛЕТНЕГО РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

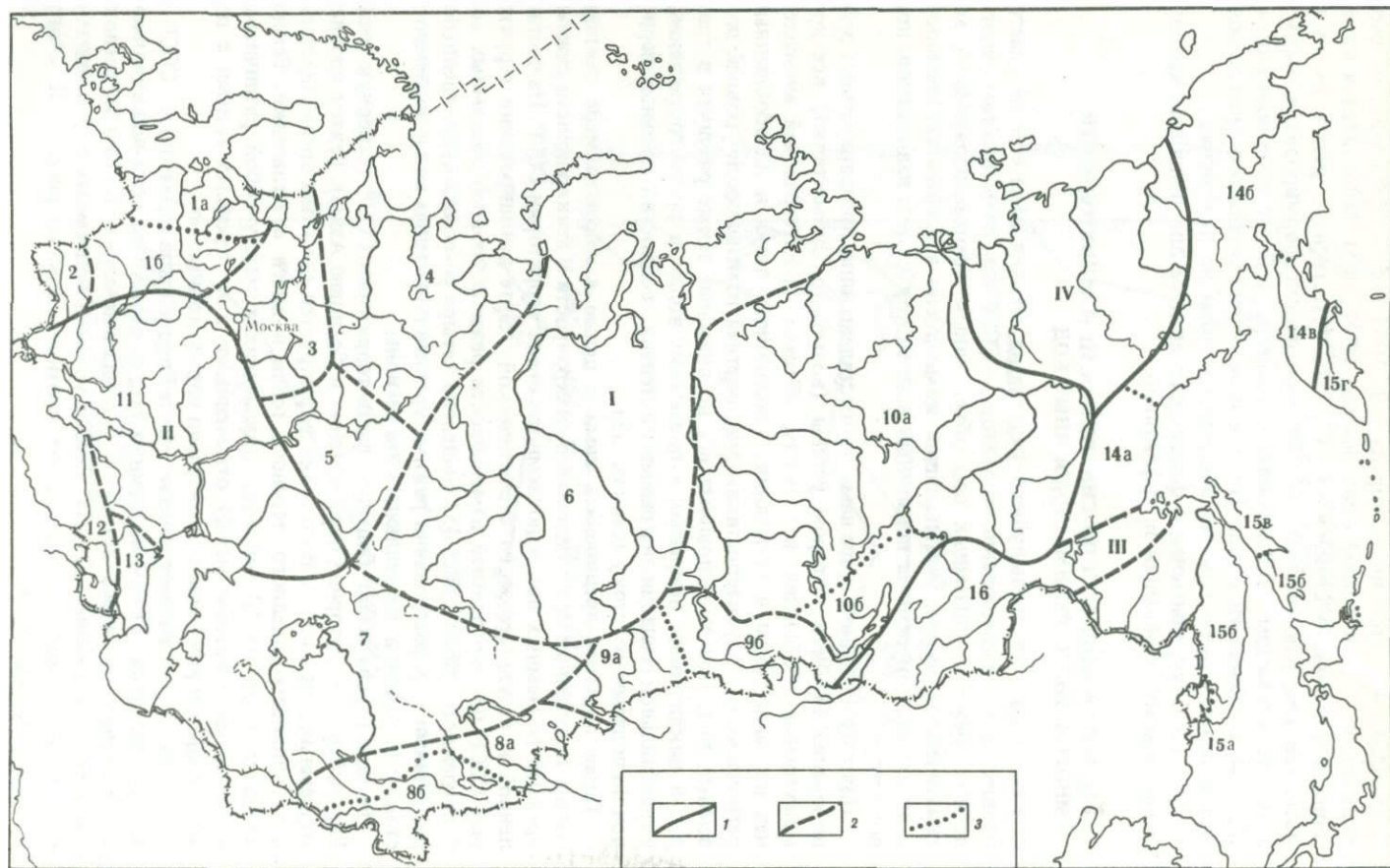
Как видно из предыдущего раздела, на сегодня пока еще не удастся осуществить районирование территории СССР по особенностям многолетнего режима подземных вод объективным (формализованным) математическим путем, учитывающим комплексно все виды синхронности и асинхронности режима подземных вод. Работа в этом направлении продолжается.

Поэтому на данном этапе нами осуществлено лишь предварительное районирование СССР, в котором учтены (возможно, субъективно) все промежуточные обобщения, и главным образом по интегральной многолетней направленности в колебаниях подземного стока и по обобщенным региональным характеристикам многолетней изменчивости уровней подземных вод. При этом принимались во внимание также различия в трендах и цикличности, вскрытых в подземных водах, а также составленные в трехбалльной градации диаграммы по степени водности отдельных периодов по подземному стоку (см. рис. 38).

Такая попытка предпринята нами с целью в какой-то мере синтезировать полученные представления о синхронности и асинхронности режима уровней подземных вод и подземного стока территории СССР. На составленной в результате этого схематической карте районирования территории СССР по многолетней изменчивости режима уровней подземных вод и подземного стока (рис. 45) выделено четыре региона с существенными различиями в формировании режима уровней подземных вод и подземного стока и 16 районов, разделяющих эти регионы.

Регион I охватывает большую часть территории СССР (северную часть Европейской территории Союза, Сибирь и Среднюю Азию). Режим уровней подземных вод и подземного стока формируется здесь под преимущественным влиянием западного переноса тепла и влаги с Атлантики. Регион подразделяется на 10 районов, отличающихся между собой различными временными сдвигами между отмеченными в их пределах годами с повышенной и пониженной относительно нормы водностью.

Регион II охватывает южную часть Европейской территории СССР и запад Казахстана. Режим подземных вод формируется здесь под влиянием юго-западного переноса ветров со Средиземноморья. В данном регионе выделено три района (11–13). Режим уровней подземных вод и подземного стока региона I имеет прямо противоположную региону II многолетнюю направленность.



Регион III охватывает территорию Дальнего Востока и Забайкалье. Многолетняя изменчивость подземных вод формируется здесь прежде всего под влиянием переноса тепла и влаги с Тихого океана и лишь частично под влиянием их переноса с Атлантики. В регионе выделено три района (14–16), в основном по данным наблюдений за подземным стоком.

Регион IV выделен по некоторой обособленности формирования режима подземного стока, связанного в основном с влиянием Арктики. Характер режима подземных вод довольно отличен от предыдущих и определен, по-видимому, существованием здесь постоянного Якутского антициклона.

Выделение всех районов в какой-то мере условно, хотя в его основу и положены количественные и качественные различия отдельных особенностей многолетней изменчивости подземных вод (теснота корреляционных связей, величины временных сдвигов в связях обобщенных региональных характеристик уровней подземных вод, различный ход интегральных графиков подземного стока).

Четких границ как между выделенными регионами, так и тем более между отдельными районами внутри этих регионов, как уже отмечалось, не существует и, видимо, вообще не может быть, так как изменения в характере режима весьма динамичны не только во времени, но и в пространстве, что наглядно проиллюстрировано на рис. 36 и 38. Подобное районирование может отражать лишь одноитишность многолетнего режима подземных вод за длительные промежутки времени. О существенном же различии в режиме подземных вод можно судить не по смежным, а по отдаленным один от другого районам, где временные сдвиги в колебаниях уровней или расходов подземных вод достигают значительных величин. Например, величины временных сдвигов связей режима подземных вод северных районов Европейской части СССР и Сибири достаточно велики (до 4 лет и более), и поэтому эти территории можно было бы даже отнести к частично асинхронным. Все это свидетельствует о том, что региональная синхронность режима подземных вод не какая-то постоянная характеристика, типичная для тех или иных территорий. Этот вывод подтверждается и характером связей уровней подземных вод с различными гелиогеофизическими факторами и сопоставлением графиков многолетних колебаний уровней подземных вод и подземного стока по территории СССР. В связи с этим для выделения районов были использованы также карты тесноты и характера связей режима уровней подземных вод и подземного стока с солнечной активностью и атмосферной циркуляцией, а также схема гидрогеологического районирования территории СССР, составленная ВСЕГИНГЕО.

В заключение следует еще раз подчеркнуть, что проблема районирования территорий по синхронности и асинхронности режимов подземных вод требует дальнейших исследований, и прежде всего в области изучения причин и механизма данного процесса.

Р и с. 45. Карта районирования территории СССР по особенностям многолетней изменчивости режима подземных вод и подземного стока

1 – границы регионов (I–IV); 2 – границы районов (1–16); 3 – границы подрайонов (a–z)

**СИНХРОННОСТЬ И АСИНХРОННОСТЬ ВНУТРИГОДОВОГО РЕЖИМА  
ПОДЗЕМНЫХ ВОД СЕВЕРНЫХ И ЮЖНЫХ РАЙОНОВ СТРАНЫ  
В СВЯЗИ С РЕШЕНИЕМ ПРОБЛЕМ  
ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТОКА**

Выделение зон с синхронным и асинхронным режимом подземных вод необходимо не только для обоснования возможности экстраполяции данных режима или изменчивости ресурсов подземных вод с ключевых наблюдательных точек или бассейнов на определенную площадь. Практические аспекты использования данного явления могут быть весьма разнообразны. В том числе нами была изучена синхронность и асинхронность режимов урвней подземных вод и подземного стока северных и южных районов страны для обоснования рациональных режимов переброски части стока северных рек в южные районы страны.

Ставя перед собой такую задачу, мы отдавали себе отчет в том, что размеры объемов переброски части стока и ее режимы будут определяться не только гидрогеологическими аспектами, а прежде всего режимом основных источников водоотбора, т.е. рек-доноров, и их расходами, режимом необходимой водоподачи потребителям (прежде всего сельскому хозяйству юга страны для орошения и Каспийскому морю для предотвращения его обмеления и сохранения биологической продуктивности), а также возможными негативными экологическими последствиями перебросок. Тем не менее не безынтересно было рассмотреть вопрос об оптимальных режимах перебросок с гидрогеологических позиций. Представлялось также важным оценить, при каких режимах водоотбора ресурсам подземных вод северных районов будет нанесен наименьший ущерб, а ресурсы подземных вод южных районов будут наиболее эффективно восполнены (прежде всего в дефицитные по водности периоды).

Следует также подчеркнуть, что выбор оптимального режима водоотбора и водоподачи — задача многоплановая и неоднозначная. Рассматривая водные ресурсы как одну из составных частей окружающей нас среды, можно легко представить, что оптимальное решение задачи по одному из взаимосвязанных ее элементов может оказаться далеко не оптимальным по другому элементу. Так, например, оптимальный режим водоотбора по отношению к естественной изменчивости питания подземных вод может оказаться неоптимальным по отношению к увлажнению заливных лугов, обеспечивающих животноводство кормами.

Поэтому, не ставя перед собой задачу рассмотреть все экономические и экологические последствия переброски части стока, что служит предметом специальных исследований, нами был рассмотрен лишь один из этих вопросов — существует ли региональная асинхронность формирования ресурсов подземных вод в многолетнем и сезонном масштабах между северными и южными районами страны, и, если таковая существует, то как можно спланировать режим водоотбора, чтобы свести к минимуму отрицательные последствия этого водоотбора для ресурсов подземных вод и условий их активного использования в будущем в северных районах.

Постановка такого вопроса определяется тем, что существенный водоотъем и переброска части стока северных рек неизбежно снижат уровни воды в реках в районах ниже зоны отъема. Это приведет к

увеличению дренированности разгружающихся в реки водоносных горизонтов, уменьшению естественных запасов подземных вод (за счет уменьшения мощностей водоносных горизонтов), ухудшению восполнения запасов подземных вод из рек на водозаборах инфильтрационного типа и уменьшению тем самым эксплуатационных запасов подземных вод в долинах рек.

Решение поставленной задачи потребовало разработки специальных методических подходов к обоснованию и составлению исходных материалов по режиму подземных вод исследуемых регионов, а также принятия определенных допущений.

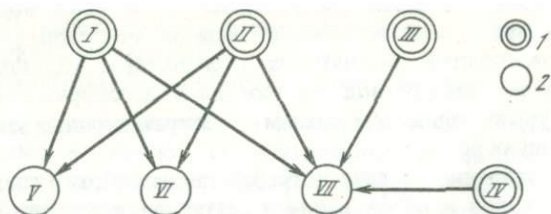
Учитывая то, что водоотбор будет осуществляться, как правило, не из одной реки, а из систем бассейнов и перераспределяться также не в какой-то один однородный по гидрогеологическим условиям район, видимо, такого рода межбассейновые переброски стока должны сказаться на изменении гидрогеологических условий больших площадей как в северных, так и в южных районах. Поэтому основная задача заключалась в изучении синхронности и асинхронности режима подземных вод не каких-то отдельных локальных участков (по данным режима одиночных скважин или даже по данным о подземном стоке определенных бассейнов), а для обширных регионов, в пределах которых влияние перебросок стока может сказаться на гидрогеологической обстановке. Таких регионов в соответствии с планами перебросок части стока первой очереди было выделено 7 (рис. 46): 1 — бассейн р. Печоры и междуречье Кама—Печора; 2 — бассейны рек Сухона, Северная Двина и озер Вожа, Лача, Ладожское; 3 — Северного Кавказа; 4 — Нижней Волги и Южного Прикаспия; 5 — низовьев рек Сырдарья и Амударья, Приаралья; 6 — юга Западной Сибири и 7 — Ферганы [Воропаев, 1982].

Районы 1, 2 и 6 представляют области отбора воды, а районы 3, 4 и 5 — области ее распределения. Район 7 выбран также как область возможного отбора воды в отдельные маловодные периоды для покрытия дефицитов в воде в бассейне р. Сырдарья, включая район 5.

Основная сложность данной работы заключается в том, что необходимые для получения обобщенных региональных характеристик внутригодового (сезонного) и многолетнего режима уровней подземных вод и подземного стока данные о многолетнем режиме уровней подземных вод по ряду водосборных бассейнов в пределах районов (1, 2) либо весьма скудны, либо отсутствуют вообще, да и по другим районам сеть развита неравномерно и в ограниченном количестве. Отсутствует также методика оценки внутригодовой изменчивости ресурсов подземных вод (подземного стока) для такого типа водосборных бассейнов.

Для получения необходимых исходных рядов наблюдений по уровням подземных вод был использован рассмотренный нами ранее прием представления фактических данных в относительных показателях — в процентах обеспеченности уровней подземных вод.

Как было ранее показано (см. гл. 1), значительные различия режима уровней подземных вод или дебитов источников (в амплитудах



Р и с. 46. Схема установления корреляционных связей режима уровней подземных вод и подземного стока между районами возможного территориального перераспределения стока

*I* – районы-доноры (*I–IV*); *2* – районы-потребители (*V–VII*)

их колебаний, темпах подъема и спада уровней или расходов, а также в количестве периодов и интенсивности питания), находящиеся в зависимости от классов, подклассов, видов и разновидностей режима т.е. от условий формирования подземных вод, могут быть обобщены для каких-то территорий одной или несколькими несущественно различающимися кривыми относительной изменчивости уровней или расходов подземных вод, выраженных в процентах их обеспеченности. Эти кривые отражают относительную изменчивость уровней подземных вод данного года или данного сезона года по сравнению с общим многолетним размахом колебаний, характерных для каждого конкретного участка. Относительная увлажненность или степень водообильности каждого года (определяемая прежде всего количеством и интенсивностью выпадения атмосферных осадков и температурами воздуха) – явление не локальное, а наблюдаемое на значительных территориях, поэтому относительная изменчивость связанного с ним питания подземных вод также характерна, как правило, для довольно крупных территорий. Этот вывод был подтвержден нами ранее путем составления обобщенных региональных характеристик режима уровней подземных вод по территории деятельности существующих гидрогеологических станций и путем рассмотренного ранее районирования территории СССР по синхронности и асинхронности режима подземных вод.

Все это позволило с определенной степенью достоверности охарактеризовать многолетний режим подземных вод, выделенных для исследования районов существующими (в пределах выполненного районирования по синхронности и асинхронности режима подземных вод) данными по обобщенной региональной изменчивости режима подземных вод (табл. 6).

Принимая во внимание большую трудоемкость составления обобщенных региональных характеристик внутригодового режима уровней подземных вод в каждом из этих районов, была выбрана опорная типичная наблюдательная скважина, многолетний режим которой наиболее точно соответствует многолетней региональной изменчивости режима подземных вод всего района. В итоге для изучения региональной асинхронности многолетнего режима подземных вод выделенных семи районов была произведена кросскорреляция многолетних рядов обобщенных региональных характеристик

Таблица 6  
Многолетний режим подземных вод

Номер кор- релируемых районов	Использованные обобщенные данные о режиме подземных вод (гидрогеологические станции)	Количество наб- людаемых сква- жин, использо- ванных в расчетах	Длина ряда, лет
1	Воркутинская	4	10
2	Северо-Западная	19	22
3	Дагестанская	4	17
4	Нижеволжская	9	23
5	Каракалпакская	12	13
6	Омская, Томская и Ново- сибирская	29	16
7	Ферганская	9	30

режима подземных вод. Для изучения же региональной асинхронности сезонного режима подземных вод была произведена кросскорреляция рядов среднемесячных многолетних значений уровней подземных вод типичных для каждого из этих районов скважин.

Для получения более полных представлений об асинхронности формирования подземных вод северных и южных районов страны в многолетнем разрезе была также произведена кросскорреляция данных по подземному стоку выбранных районов. Для этого были составлены обобщенные региональные характеристики подземного стока за многолетние, выраженные в процентах обеспеченности. Они были рассчитаны как средние величины из значений обеспеченностей минимальных зимних расходов рек по ряду постов, имеющих в пределах выделенных районов. Для изучения асинхронности формирования внутригодового подземного стока этих районов потребовалось разработать специальный прием для определения такого стока путем совместного анализа режима поверхностных и подземных вод, рассмотренный в гл. 1.

Выполненные методические разработки позволили построить или отобрать необходимые исходные многолетние ряды годовых или среднемесячных значений уровней подземных вод и подземного стока по выбранным семи районам и провести их кросскорреляцию для оценки степени синхронности или асинхронности формирования режима подземных вод. Результаты этих расчетов сводятся к следующему.

## Сибирский вариант переброски стока

Кросскорреляция обобщенных региональных средних годовых характеристик уровней подземных вод различных районов Казахстана и Средней Азии с данными режима подземных вод юга Западной Сибири (Омской гидрогеологической режимной партией) показала (табл. 7), что лишь районы Карагандинской и Павлодарской областей имеют практически синхронный многолетний режим подземных вод с южными районами Западной Сибири. В остальных же районах отмечается существенная асинхронность с временными сдвигами до 3–5 лет. В частности, между районным отъема воды (р. Иртыш) и районом водоподачи (Приаралье – Западно-Казахстанская, Мангышлакская, Каракалпакская [Воропаев, 1982], а также Кустанайская области) установлена четкая асинхронность со сдвигом в 3 года при коэффициентах корреляции 0,83–0,90. При этом если с крайне западными районами Казахстана уровни подземных вод при 3-летнем сдвиге находятся в той же фазе с колебаниями уровней юга Сибири, то в районах вдоль трассы переброски они находятся в противофазе. Это позволяет обосновать 2–3 летний режим изменений нагрузок переброски (по гидрогеологическим критериям).

Между районами отбора воды в Западной Сибири и предгорьями Тянь-Шаня [Воропаев, 1982] (районами возможного периодического форсированного отбора подземных вод) также существует асинхронность в режиме подземных вод с временными сдвигами до 5 лет (см. данные

Т а б л и ц а 7

Взаимосвязанность региональных характеристик режима подземных вод Омской области и ряда областей Казахстана и Средней Азии

Гидрорежимная станция	Длина ряда, лет	Коэффициент парной корреляции	Временные сдвиги, лет	Коэффициенты корреляции при установленном сдвиге
Западно-Казахстанская	14	0,06	3	0,87
Мангышлакская	9	0,19	3	0,83
Муынкумская	21	-0,32	4	-0,52
Карагандинская	26	0,76	0	-
Кайракумская	21	-0,18	3	-0,40
Курган-Тюбинская	26	-0,12	4	-0,64
Ташаузская	11	-0,02	1	-0,33
Павлодарская	13	0,52	1	0,64
Каракалпакская	12	0,42	3	-0,83
Кашкардаринская	14	0,14	2	-0,80
Зеравшанская	14	0,01	1	-0,56
Бухарская	45	-0,14	2 (5) *	0,32 (0,74) *
Теджен-Мургабская	25	0,48	0	-
Ферганская	30	0,55	0(5) *	(0,62) *
Кустанайская	14	0,24	3	-0,90

\* Цифры в скобках характеризуют величину временного сдвига в связях, выделенную по второму, но более четкому всплеску кросскорреляционной функции, и коэффициенты корреляции связи рядов при этих сдвигах.

по Ферганской и Бухарской станции в табл. 7). Это также позволяет использовать подземные воды предгорий в отдельные маловодные периоды, наблюдаемые в районах переброски стока с тем, чтобы увеличить сток Сырдарьи и Амударьи для его использования в низовьях рек в целях покрытия дефицитов в воде в эти периоды.

Кросскорреляция среднемесячных значения уровней подземных вод по этим же районам также вскрыла временные сдвиги в сезонных колебаниях от 1–3 месяцев по той же фазе до 8 месяцев по противоположной фазе. Это позволяет определить режимы водоотбора и в пределах каждого года. Наиболее интенсивный водоотбор, как следует из этих расчетов, выгоднее всего производить в мае–июле, т. е. в периоды высоких уровней подземных вод в Западной Сибири, что, видимо, хорошо увязывается с изменениями потребности в воде на орошение в южных районах.

### Европейский вариант переброски стока

Здесь была рассмотрена когерентность режима подземных вод северо-западного и северо-восточного региона ЕТС с районами Предкавказья, Нижней Волги и Среднеазиатских предгорий (см. схему рис. 46).

Кросскорреляция обобщенных среднегодовых значений уровней подземных вод этих регионов показала, что режим подземных вод северных и южных районов страны в многолетнем разрезе асинхронен или частично асинхронен. Коэффициенты корреляции этих связей при нулевом сдвиге отрицательны, а при сдвиге в 1 год степень асинхронности еще более возрастает (табл. 8). Лишь при сдвигах в 2–3–4 года коэффициенты корреляции меняют знак. Аналогичная картина наблюдается и по подземному стоку. Отсюда можно сделать вывод, что переброска вод из северо-западных районов ЕТС в южные в дефицитные для южных районов периоды может увеличиваться как в первый, так и особенно во второй маловодный год, так как в это время в северных районах питание подземных вод возрастает. Периодичность необходимого и возможного увеличения таких перебросок с северо-запада на юг составляет 3 года, а с северо-востока на юг – 2 года. Кросскорреляционные связи данных по уровням подземных вод и подземному стоку северных районов ЕТС и богатых подземными водами предгорных районов Средней Азии оказались прямыми с небольшими (1–2 года) временными сдвигами некоторого увеличения тесноты связей. Смена знаков связей на противоположный отмечена по уровням подземных вод через 4–5 лет, а по подземному стоку – через 3 и 7 лет соответственно с северо-западным и северо-восточным районами ЕТС. Это свидетельствует также о том, что в маловодные периоды в районах Приаралья величины перебросок стока могут увеличиваться не только из северных районов ЕТС, но и со стороны предгорий Средней Азии. При этом сопоставление степени тесноты связей и величин временных сдвигов позволяет даже определить оптимальный режим перебросок из разных районов. Так, в первый маловодный год в южных засушливых районах страны целесообразно увеличивать водоотбор на северо-востоке ЕТС, на второй год – на северо-западе ЕТС, а на третий-четвертый, если такие последуют, – только в предгорьях Средней Азии, так как в это время в северных районах ЕТС уже наступит маловодный период.

Т а б л и ц а 8

Корреляционная связь уровней подземных вод и подземного стока северных и южных районов территории СССР (с учетом временных сдвигов)

Район	Северо-запад ЕТС			Северо-восток ЕТС		
	среднегодовые уровни	подземный сток	среднемесячные уровни	среднегодовые уровни	подземный сток	среднемесячные уровни
Предкавказье	0	0	0	0	0	0
	$\frac{-0,22}{-0,4}$	$\frac{-0,18}{+0,1}$	$\frac{0}{-0,14}$	$\frac{-0,8}{+0,32}$	$\frac{-0,12}{-0,32}$	$\frac{0}{-0,18}$
	$\frac{1}{+0,38}$	$\frac{2}{+0,4}$	$\frac{3}{-0,14}$	$\frac{2}{+0,32}$	$\frac{1}{-0,32}$	$\frac{2}{+0,1}$
Нижнее Поволжье	0		0	0		0
	$\frac{-0,42}{-0,05}$		$\frac{0}{+0,16}$	$\frac{0}{+0,2}$		$\frac{0}{-0,06}$
	$\frac{1-2}{+0,4}$		$\frac{1-2}{+0,3}$	$\frac{2}{+0,3}$		$\frac{4-5}{+0,44}$
Приаралье	0		0	0		0
	$\frac{-0,06}{-0,38}$		$\frac{0}{+0,008}$	$\frac{-0,8}{+0,01}$		$\frac{-0,28}{+0,6}$
	$\frac{1}{+0,22}$		$\frac{2-3}{-0,28}$	$\frac{3}{+0,01}$		$\frac{6-7}{+0,6}$
Предгорья Средней Азии	0	0	0	0	0	0
	$\frac{0,32}{0,44}$	$\frac{0}{+0,18}$	$\frac{0}{+0,05}$	$\frac{0}{+0,14}$	$\frac{0}{+0,18}$	$\frac{0}{+0,24}$
	$\frac{1-2}{0,44}$	$\frac{3}{-0,18}$	$\frac{4-5}{-0,2}$	$\frac{2}{+0,6}$	$\frac{7}{-0,58}$	$\frac{4-5}{-0,4}$
	$\frac{4-5}{-0,12}$					

Примечание. В числителе – величина временного сдвига, годы в знаменателе – величина коэффициента кросскорреляции связей при соответствующем временном сдвиге.

При изучении сезонной асинхронности режима уровней подземных вод районов-доноров и районов-потребителей было установлено отсутствие синхронности режима и наличие временных сдвигов в связях до 3–5 месяцев, т. е. без учета временных сдвигов коэффициенты корреляции связей режима уровней подземных вод (по среднемесячным их значениям) се-

верных и южных районов близки к нулю. При учете сдвигов эти связи проявляются, но в большинстве случаев не очень четко (коэффициенты корреляции низки – 0,2–0,4). Тем не менее можно отметить, что между северо-западом и югом ЕТС наблюдаются сдвиги в связях режима подземных вод, достигающие 2–3 месяцев при отрицательных коэффициентах корреляции, т. е. с интервалом в 2–3 месяца, максимуму уровней на северо-западе ЕТС соответствует минимум уровней на юге ЕТС. Между северо-востоком и югом ЕТС существуют временные сдвиги в 4–5 месяцев, а с Приаральем до 6 месяцев. Аналогичные (4–5 месяцев) величины временных сдвигов в связях режима уровней подземных вод установлены и между севером ЕТС в целом и предгорными районами Средней Азии.

Вскрытые многолетние статистические закономерности режима уровней подземных вод позволяют также сформулировать рекомендации по оптимизации сезонного режима перебросок стока. Из приведенных данных следует, что для покрытия дефицитов в воде южных районов в летнее время наиболее целесообразно увеличивать объемы перебросок в апреле–мае из северо-западных районов, а в июне–августе из северо-восточных. Со стороны же предгорных районов Средней Азии ежегодная сезонная переброска стока нецелесообразна, так как режим этих районов синхронен с районами-потребителями, и поэтому ее лучше резервировать лишь на отдельные наиболее маловодные годы и наиболее маловодные периоды этих лет.

В заключение данной главы следует сказать, что исследование синхронности и асинхронности режима подземных вод представляет большой теоретический и практический интерес. Вскрытые закономерности позволяют не только оптимизировать режим использования водных ресурсов вообще (включая мероприятия по переброске стока) и ресурсов подземных вод в частности, но и обосновать пути прогнозирования режима подземных вод и многолетней изменчивости их ресурсов. Вскрытые временные сдвиги в связях режима уровней подземных вод и подземного стока различных районов, достигающие 3–4 лет, дают возможность составлять соответствующей заблаговременности прогнозы режима и ресурсов подземных вод.

Задача дальнейших исследований в данной области заключается в подтверждении наметившихся закономерностей многолетнего режима подземных вод на большом фактическом материале и, прежде всего, повышении детальности данной изученности по южным районам страны, где учет многолетней изменчивости режима подземных вод может дать наибольший практический эффект. Кроме того, следует продолжить поиск в направлении повышения объективности районирования страны по синхронности и асинхронности режима подземных вод на основе сочетания применения математических приемов анализа с генетическим гидрогеологическим анализом закономерностей режима подземных вод. Представляет интерес рассмотрение глобальных закономерностей проявления синхронности и асинхронности режима подземных вод в целях его долгосрочного прогнозирования.

## УЧЕТ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ЧЕРЕДОВАНИЯ СЕРИЙ МАЛОВОДНЫХ И МНОГОВОДНЫХ ЛЕТ В ПИТАНИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ РАЦИОНАЛЬНОГО ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ПУТИ ЕЕ РЕШЕНИЯ

Естественное восполнение ресурсов подземных вод, как известно, весьма неравномерно как в течение различных сезонов года, так и в многолетнем разрезе. Это затрудняет планирование использования подземных вод, и в частности обоснования гарантированности отбора минимально возможных или каких-то других величин их ресурсов, оцениваемых для водоснабжения, а в отдельных случаях и для орошения.

Основами водного законодательства СССР (10 декабря 1970 г.)<sup>1</sup> использование подземных вод для целей, не связанных с питьевым водоснабжением, допускается лишь в исключительных случаях, поэтому учет многолетней изменчивости питания подземных вод и повышение детальности оценок запасов хозяйственно-питьевых вод особенно важны при проектировании водозаборов и оценках эксплуатационных запасов подземных вод на конкретных месторождениях, а также при региональных оценках ресурсов подземных вод, выполняемых в рамках генеральных схем комплексного использования водных ресурсов в целом, включая и ресурсы подземных вод.

Формы практического учета многолетней изменчивости режима и ресурсов подземных вод могут быть различными.

1. В виде анализа возможных многолетних изменений уровней или мощностей горизонтов подземных вод, являющихся основным гидрогеологическим параметром, который используется при расчетах эксплуатационных запасов подземных вод.

Подобный анализ важен в тех случаях, когда амплитуды колебаний уровней подземных вод соизмеримы (не менее 20%) с мощностями водоносного горизонта. Подобные ситуации могут наблюдаться в долинах небольших рек; в районах, сложенных карстовыми и трещиноватыми породами, на междуречьях рек и в других случаях.

2. В определении продолжительности маловодных и многоводных периодов в естественном восполнении запасов подземных вод с целью определения времени гарантированной сработки емкости водоносных горизонтов в маловодный период при условии ее полного восстановления в последующий многоводный период. Подобный анализ может быть важным для водоносных горизонтов, обладающих хорошими условиями восполнения запасов подземных вод и достаточно большими емкостными возможностями водоносных горизонтов, например в флювиогляциальных, пролювиальных, аллювиальных и других горизонтах, когда в струк-

<sup>1</sup> Решения партии и правительства по хозяйственным вопросам. М.: Политиздат, 1972, т. 8, с. 258.

туре оцениваемых эксплуатационных запасов подземных вод естественные ресурсы (величина питания или расход потока подземных вод) составляют существенную часть по сравнению с естественными запасами (емкостью) водоносного горизонта.

Аналогичная задача решается и при оценках запасов подземных вод на бесконечно большой срок, т. е. тогда, когда основой эксплуатационных запасов служит питание или расход подземных вод.

3. В определении изменчивости восполнения запасов подземных вод из рек как при наличии постоянного стока в реке, так и особенно для долин с пересыхающим или разбираемым на различные нужды стоком в отдельные периоды года. Этот случай представляет собой разновидность предыдущего, но здесь решаемая гидрогеологическая задача тесным образом связана уже с гидрологической характеристикой, так как продолжительности маловодных сезонных и многолетних периодов восполнения запасов подземных вод зависят от режима поверхностного стока и условий его поглощения.

4. В форме расчетов гарантированных величин родникового стока как при непосредственном каптировании родников для целей водоснабжения, так и при изучении возможностей сезонного или многолетнего регулирования родникового стока путем инверсирования родников скважинными водозаборами. Подобный анализ важен для различных гидрогеологических условий в горных и предгорных районах, а также в районах развития карста [Kullman, 1979].

В большинстве случаев перечисленные задачи решаются на основе чисто статистических расчетов. Для этого используются достаточно длинные или наращенные тем или иным путем ряды наблюдений, а при коротких рядах наблюдений за режимом подземных вод используются данные об атмосферных осадках или поверхностном стоке и затем через пересчетные коэффициенты оцениваются величины уровней или расходов (дебитов) подземных вод различной обеспеченности, которые и берутся в основу расчетов запасов подземных вод. Однако такой подход весьма произволен и чаще всего приводит к существенным занижениям запасов подземных вод, что при дефиците качественной воды недопустимо. Связано это с тем, что при таком подходе объективно не доказывается, какую обеспеченность следует принимать в качестве расчетной — 99-, 95-, 80-, 75%-ную или какую-то другую. В итоге произвольно выбирается минимальная величина (соответствующая обычно 95%). Это означает, что уровни или расходы подземных вод ниже расчетной величины могут быть встречены в пяти годах за 100 лет. Когда же эти годы выявятся — через год или через 90 лет, т. е. далеко за пределами расчетного срока работы водозабора, принимаемого обычно за 25–27 лет. Не оценивается также и то, как эти маловодные годы могут выявиться в процессе эксплуатации — по одному году, разделенные многолетними многоводными периодами, или все пять лет подряд? Решение этих вопросов при планировании эксплуатации подземных вод немаловажно, так как они прямо определяют период возможной сработки емкостных запасов подземных вод между этапами их восполнения и тем самым прямо определяют величину их эксплуатационных запасов.

Более перспективен, по-видимому, комбинированный подход к та-

ким расчетам, основанный на статистическом анализе фактических рядов наблюдений с учетом вскрытых региональных закономерностей в режиме подземных вод и подземного стока, и в частности на исследовании продолжительности серий маловодных и многоводных лет различной обеспеченности и обосновании оптимальных периодов сработки их емкостных запасов.

Учет продолжительности существующих серий маловодных и многоводных лет существенно влияет на определение величин всех трех основных составляющих эксплуатационных запасов подземных вод. Так, доля участия естественных запасов в формировании эксплуатационных запасов ( $Q_{\text{ест. зап}}$ ) водоносного горизонта зависит не только от его емкости, но и от времени, за которое предполагается их сработка. Это же время может быть выбрано в зависимости от распределения интенсивности питания подземных вод в сезонном (внутригодовом) или многолетнем разрезе.

В результате сработку емкости можно планировать либо на несколько маловодных месяцев каждый год с учетом ее полного восполнения в другие более многоводные месяцы года, либо на несколько маловодных лет с учетом полного восполнения в последующие многоводные годы, либо на весь срок эксплуатации без учета естественного питания подземных вод. В зависимости от выбора варианта сработки емкости водоносных горизонтов величины естественных запасов могут меняться на один-два порядка. Объемы же этих естественных или емкостных запасов, как показывает опыт, часто оказываются достаточными для обеспечения водой крупных населенных пунктов и городов.

Наличие регулирующей емкости водоносных горизонтов при этом лишь — одно из условий возможного увеличения утверждаемых эксплуатационных запасов подземных вод. Другое не менее важное условие заключается в возможности ее заполнения в многоводный период после истощения (сработки) в маловодный период. Поэтому при оценках естественных ресурсов подземных вод ( $Q_{\text{ест. рес}}$ ) необходимо оценивать: а) минимальную гарантированную величину питания или разгрузки подземных вод, которую можно забирать практически всегда (естественно, в период, когда такое питание имеется); б) возможное естественное увеличение питания подземных вод в отдельные периоды в годовом и многолетнем разрезе, которое может обеспечить восполнение сработанных емкостных запасов или может явиться дополнительным резервом увеличения производительности водозаборов.

В итоге при решении этих задач возникают следующие вопросы, требующие анализа и оценки.

1. Какова продолжительность наиболее вероятных маловодных периодов в каждом конкретном регионе?

2. Каков возможный характер появления таких маловодных периодов и при каких условиях после каждого маловодного периода определенной длины должен последовать не менее продолжительный многоводный период, способный обеспечить восполнение сработанных запасов?

3. Можно ли обосновать в каждом конкретном случае оптимальную обеспеченность расходов или питания подземных вод, при которой при минимальных периодах сработки можно было бы отобрать максимум

подземных вод с заданной гарантией их последующего восполнения до очередного периода сработки емкости водоносных горизонтов?

Аналогичные вопросы возникают и при оценках привлекаемых запасов ( $Q_{\text{прив. зап}}$ ). Однако при этом они относятся к источнику восполнения, т. е. обычно к гидрологическим данным, так как основным источником восполнения чаще всего служат реки, и в этом случае необходимо знать их минимальные расходы, оптимальные периоды маловодий и гарантированность инфильтрации речных вод в многоводные периоды, определяемой пропускной способностью русловых и пойменных отложений, для обеспечения полного восстановления сработанных запасов подземных вод.

### ПОНЯТИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ПИТАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

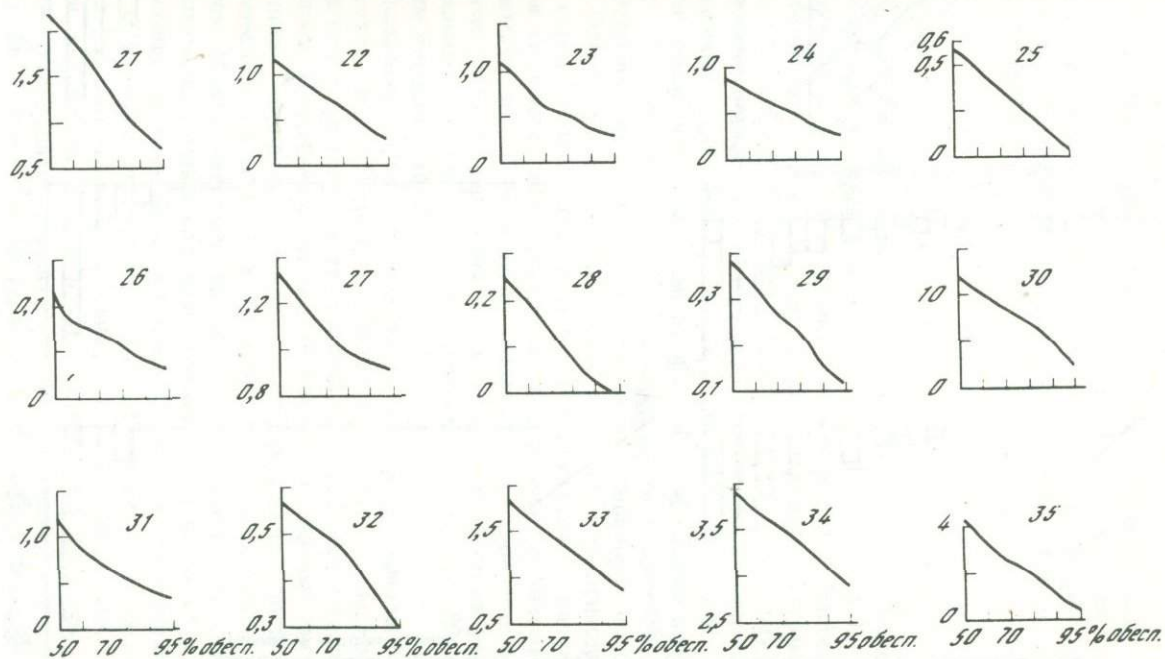
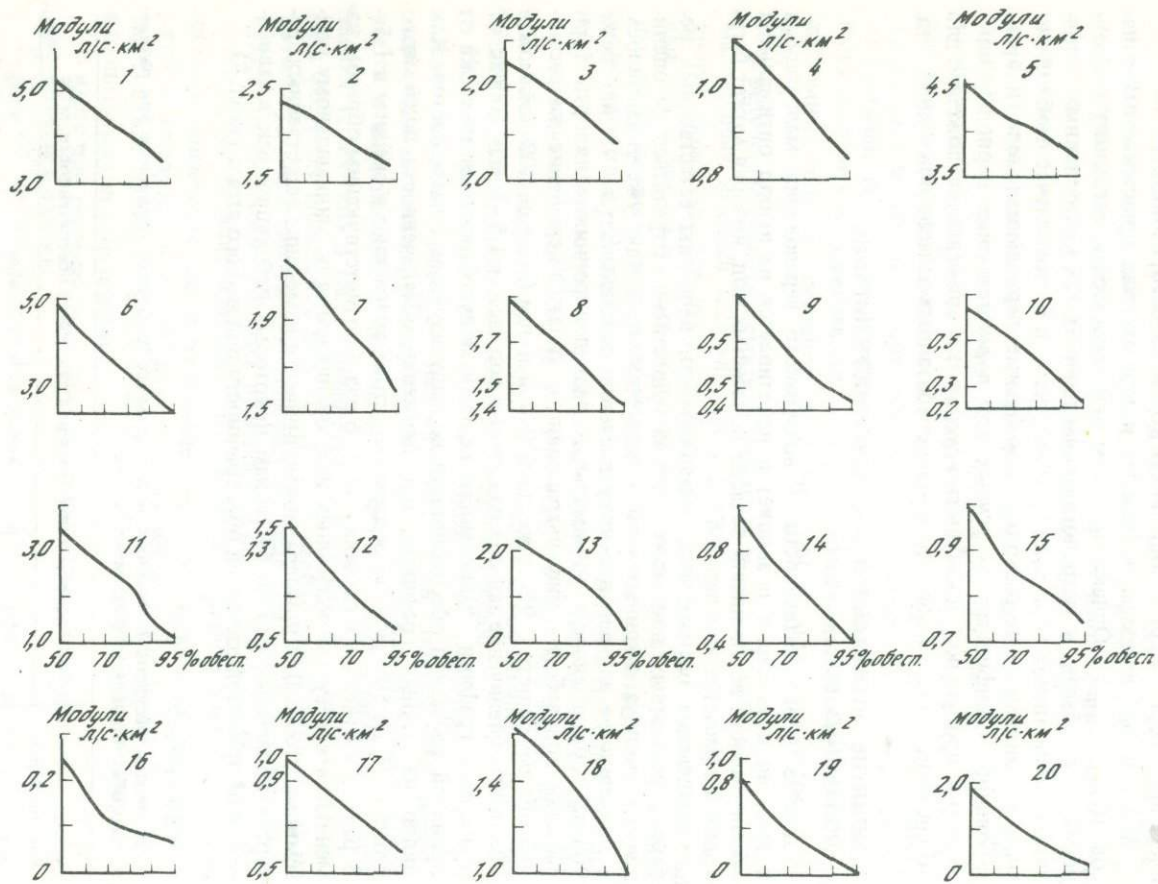
Анализ продолжительности и возможного чередования маловодных и многоводных серий позволяет и нацеливается на выбор оптимальной обеспеченности восполнения запасов подземных вод, которая может быть принята в расчетах этих запасов.

Определение оптимальной обеспеченности величины естественных ресурсов подземных вод может весьма существенно отразиться на оцениваемых эксплуатационных запасах подземных вод. Как уже указывалось, в большинстве случаев в основу расчетов закладывается 95- или реже 90%-ная обеспеченность минимальных расходов родников или рек (при расчетах водозаборов инфильтрационного типа). Уменьшение же расчетной обеспеченности с 95- даже до 90%-ной и тем более до 80%-ной может обеспечить увеличение запасов подземных вод часто в 1,5–3 раза. На рис. 47 приведены графики зависимости величин модулей подземного стока от принятой расчетной обеспеченности по ряду изученных нами постов. Как видно из данных графиков, при снижении обеспеченности подземного стока с 95 до 50% модули подземного стока возрастают в среднем в 1,5–3 раза, а в отдельных случаях — в 3–6 раз. Соответствующим образом изменяются и ресурсы подземных вод, оцениваемые по минимальному подземному стоку. Для примера можно привести изменение естественных ресурсов подземных вод по бассейнам некоторых небольших рек в зависимости от принятой расчетной обеспеченности подземного стока (табл. 9).

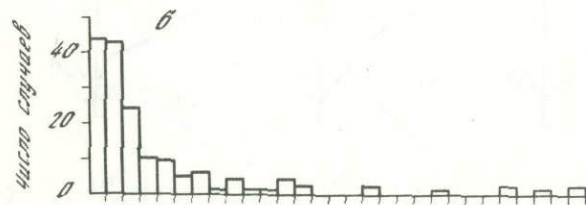
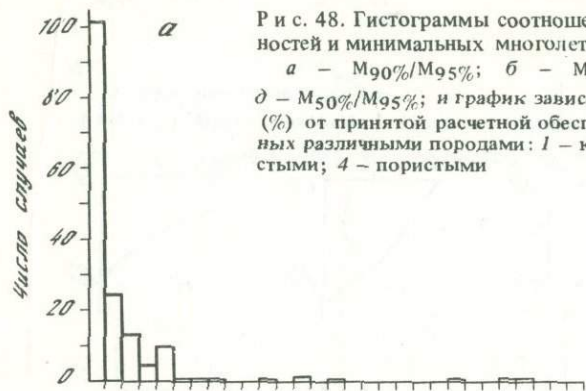
Т а б л и ц а 9

Величины ресурсов подземных вод отдельных бассейнов, оцененные при различных обеспеченностях подземного стока

Бассейны рек	Ресурсы подземных вод различной обеспеченности, м <sup>3</sup> /с			
	75%	80%	90%	95%
Южный Буг	3,1	2,8	2,0	1,3
Сож	2,75	2,6	2,3	2,0
Проголя	20,0	17,0	13,0	10,0
Алазани	23,0	21,0	17,0	12,0
Псекупс	17,0	14,0	8,0	4,0
Шахе	17,0	15,0	11,5	8,5
Ксани	3,4	3,0	2,5	2,1

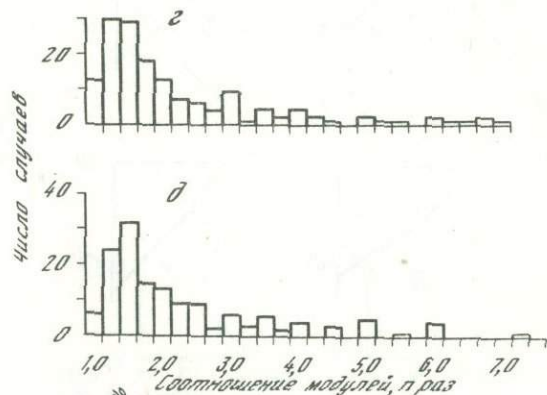


Р и с. 47. Графики зависимости величин модулей подземного стока от заданной расчетной обеспеченности стока  
1-35 - номера гидропостов



Р и с. 48. Гистограммы соотношений модулей подземного стока различных обеспеченностей и минимальных многолетних модулей.

*a* —  $M_{90\%}/M_{95\%}$ ; *б* —  $M_{80\%}/M_{95\%}$ ; *в* —  $M_{70\%}/M_{95\%}$ ; *г* —  $M_{60\%}/M_{95\%}$ ; *д* —  $M_{50\%}/M_{95\%}$ ; и график зависимости (*e*) среднего прироста запасов подземных вод (%) от принятой расчетной обеспеченности подземного стока для водосборов, сложенных различными породами: 1 — карстовыми; 2 — трещиноватыми; 3 — трещинно-пористыми; 4 — пористыми



Изменение обеспеченности с 95 до 75% в указанных примерах даст прирост запасов подземных вод в 1,5–4 раза.

Для оценки степени наиболее вероятного наращивания естественных ресурсов подземных вод в различных гидрогеологических районах страны за счет понижения расчетной обеспеченности подземного стока были составлены гистограммы соотношения модулей подземного стока различных обеспеченностей:

$$\frac{M_{60\%}}{M_{95\%}}; \frac{M_{70\%}}{M_{95\%}}; \frac{M_{80\%}}{M_{95\%}}; \frac{M_{90\%}}{M_{95\%}}.$$

Эти гистограммы показали значительный разброс значений увеличения естественных ресурсов подземных вод от 1,1 до 7,2 раза при различных соотношениях модулей подземного стока (рис. 48). Наиболее вероятные величины увеличения ресурсов (судя по пикам гистограмм) находятся чаще всего в пределах 20–60%, оцениваемых по подземному стоку 95%-ной обеспеченности. Анализ возможного увеличения запасов подземных вод в различных природных условиях и для различных расчетных обеспеченностей подземного стока дан на рис. 48. Приведенные примеры показывают, что снижение расчетной обеспеченности подземного стока может существенно повысить оцениваемые эксплуатационные запасы подземных вод. Однако уменьшение расчетной обеспеченности приводит к повышению вероятности появления более продолжительных маловодных серий, т.е. к снижению гарантированности восполнения срабатываемых запасов подземных вод. В этом легко убедиться, если хронологические графики режима уровней подземных вод или подземного стока расчленить горизонтальными линиями, соответствующими 50-, 60-, 70-, 80-, 90- и 95%-ной обеспеченности (рис. 49).

Указанные горизонтальные линии выделили периоды маловодных и многоводных лет, продолжительность которых оказалась существенно различной в зависимости от принятой расчетной обеспеченности подземного стока. Приведенные на рис. 49 примеры позволяют также определить и понятие "маловодный период", т.е. его продолжительность также условна и существенно зависит от требований, которые мы ставим перед этим понятием. Можно, например, называть маловодными годы с расходами или питанием подземных вод ниже нормы, что и понимается при изучении изменчивости ресурсов во времени. Однако при планировании эксплуатации подземных вод маловодными правильнее называть лишь те годы, когда расходы или питание становятся ниже планируемой производительности водозабора. Такой подход, естественно, приемлем только в том случае, когда планируемый водоотбор превышает естественное восполнение, т.е. когда данная задача имеет практический смысл. В таких условиях продолжительность маловодного периода прямо зависит от принятой в качестве расчетной обеспеченности расхода или питания подземных вод. Поэтому обоснование и выбор расчетной обеспеченности для оценок эксплуатационных ресурсов подземных вод неотделимы от анализа возможных продолжительностей маловодных периодов при каждой расчетной обеспеченности.

Расчет средней продолжительности серий маловодных лет в восполнении ресурсов подземных вод различной обеспеченности по каждому ряду

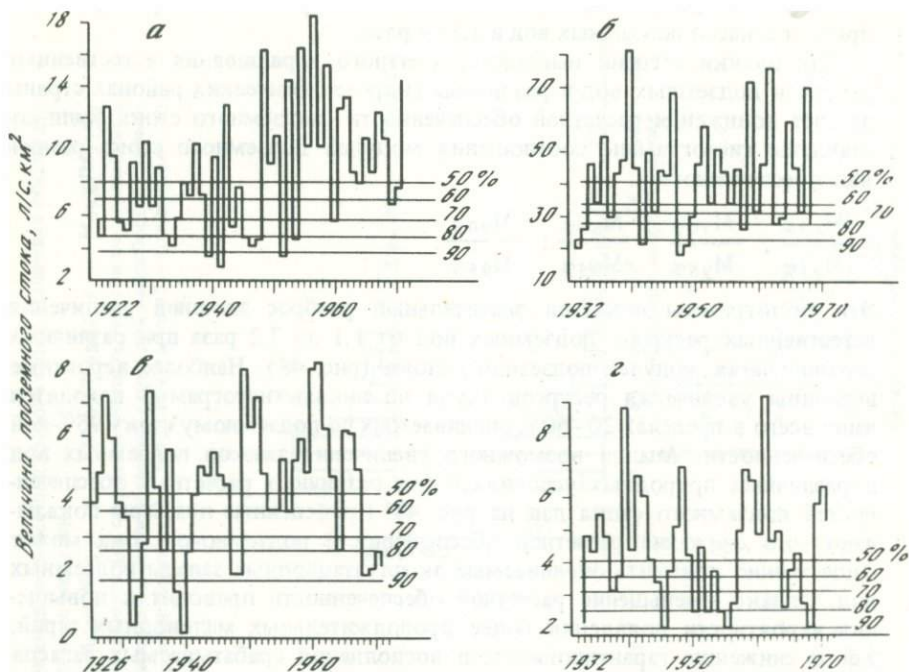


Рис. 49. Определение периодов продолжительности маловодных и многоводных лет по бассейнам рек Пяру (а), Бзыбь (б), Нижняя Тунгуска (в), Песчаная (г) в зависимости от заданной расчетной обеспеченности подземного стока

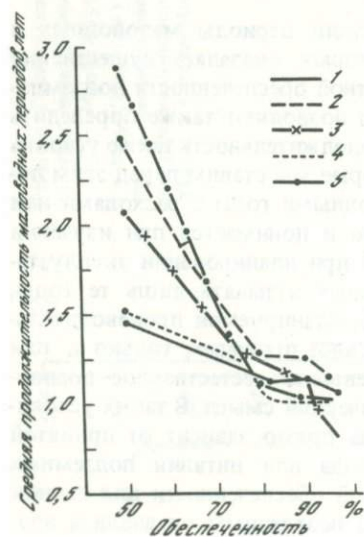
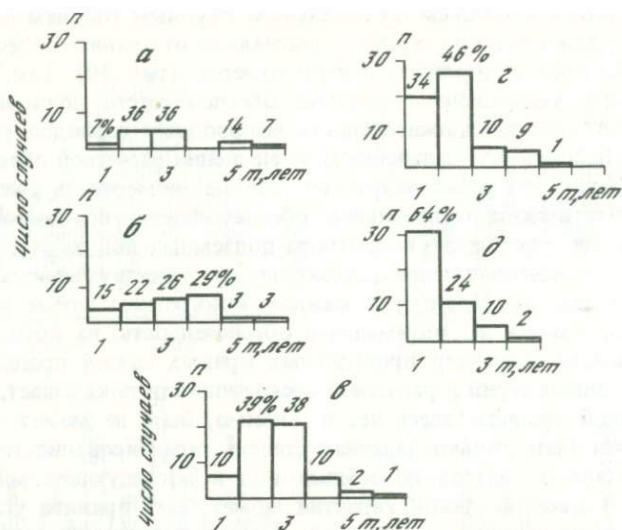


Рис. 50. Зависимость продолжительности маловодных серий (лет) от обеспеченности подземного стока (%) по ряду районов СССР  
1 - Прибалтийский; 2 - Северный; 3 - Западно-Сибирский; 4 - Причерноморский; 5 - Забайкальский

в отдельности и в среднем по отдельным крупным районам показал, что продолжительность таких серий в зависимости от принятой обеспеченности в различных районах изменяется неравномерно (рис. 50). Так, во многих районах при уменьшении расчетной обеспеченности подземного стока с 95 до 80%-ной продолжительность маловодных периодов растет несущественно и лишь при дальнейшем уменьшении расчетной обеспеченности до 70–60%-ной она резко возрастает. Эта закономерность уже открывает перспективы выбора оптимальной обеспеченности, при которой может быть получено увеличение водоотбора подземных вод за счет понижения расчетной обеспеченности при одинаковых по существу периодах сработки емкостных запасов. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо обосновать, какова же оптимальная обеспеченность, на которую можно считать запасы? Характер приведенных кривых связей продолжительностей маловодных серий и расчетной обеспеченности показывает, что строго обоснованной границы здесь нет и, видимо, быть не может. Критерием здесь может быть только заданная степень гарантированности восполнения сработанных запасов подземных вод в последующие многогодные периоды. В качестве такой гарантии может быть принято условие, при котором после каждой маловодной серии определенной длины должна последовать многоводная серия, по продолжительности и объемам восполнения превышая тот дефицит в воде, который может накопиться за маловодную серию. Таким образом, под оптимальной расчетной обеспеченностью ресурсов подземных вод следует понимать такую обеспеченность, при которой соответствующая ей величина ресурсов подземных вод гарантирована восполнением после каждого типичного для данной обеспеченности маловодного периода.

#### ОЦЕНКА ОПТИМАЛЬНОЙ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ПО ЭМПИРИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Оптимальная обеспеченность ресурсов подземных вод может быть оценена как по эмпирическим данным, так и на основе теоретических вероятностных расчетов. Наиболее нагляден анализ эмпирических данных, основанный на изучении существующих наиболее длинных рядов наблюдений. Заключается он в оценках возможных продолжительностей и чередований серий маловодных и многоводных лет в подземном стоке при различных заданных расчетах обеспеченностях подземного стока. Для этой цели все графики колебаний подземного стока за многолетие были рассечены линиями, соответствующими 50-, 60-, 70-, 80-, 90- и 95%-ной обеспеченности (как это показано на рис. 49). Соответствующие выбранным градациям обеспеченности расходы подземного стока были определены по построенным предварительно кривым обеспеченности по каждому из анализированных рядов. Всего подобный анализ был выполнен для 187 хронологических рядов наблюдений за подземным стоком продолжительностью от 20 до 87 лет (чаще всего 35–40 лет). При этом одновременно оценивались: 1) общее количество маловодных фаз в пределах всего ряда фактических наблюдений относительно различных принятых градаций обеспеченностей расходов подземных вод: 50, 60, 70, 80, 90 и 95%; 2) продолжительность маловодных фаз и число вскрытых маловод-



Р и с. 51. Гистограммы продолжительности маловодных серий ( $\tau$ , лет) для различных обеспеченностей выполнения

$a - 0,5$ ;  $б - 0,6$ ;  $в - 0,7$ ;  $г - 0,8$ ;  $д - 0,9$ ;  $n$  - число случаев

ных периодов каждой продолжительности, кратной году (1, 2, 3 и т. д.); 3) число и процент маловодных фаз, обеспеченных выполнением, т.е. когда после каждой маловодной фазы следует многоводная не меньшей продолжительности и выраженная, таким образом, в процентах гарантированности выполнения. Эта последняя оценка и была итоговой. За оптимальную расчетную обеспеченность расходов подземного стока принималась такая, при которой после всех 100% вскрытых маловодных периодов следовали соответствующей или большей продолжительности многоводные периоды.

Результаты исследований позволили вскрыть следующие основные закономерности.

1. Общее количество маловодных фаз при уменьшении расчетной обеспеченности подземного стока от 90 до 50% в большинстве случаев закономерно увеличивается. Однако в некоторых бассейнах эта закономерность нарушается, и общее количество маловодных периодов при каких-либо промежуточных значениях обеспеченностей (70–80%) оказывается максимальным. Это связано, видимо, со структурой многолетней изменчивости подземного стока, отраженной в законе распределения величин подземного стока (что еще требует дополнительного изучения).

2. Чаше встречаются продолжительности маловодных периодов для высоких расчетных обеспеченностей однолетние при значительной доле 2-летних. Так, например, при квантиле обеспеченности 0,9 (т.е. при 90%-ной обеспеченности) однолетние маловодные серии составляют 64% от общего числа маловодных серий продолжительностью в 1–4 года (рис. 51). При квантиле же 0,8 преобладают уже 2-летние серии (46%) при значительной доле однолетних (34%) и при малой доле длиннопериодных серий (3–5-

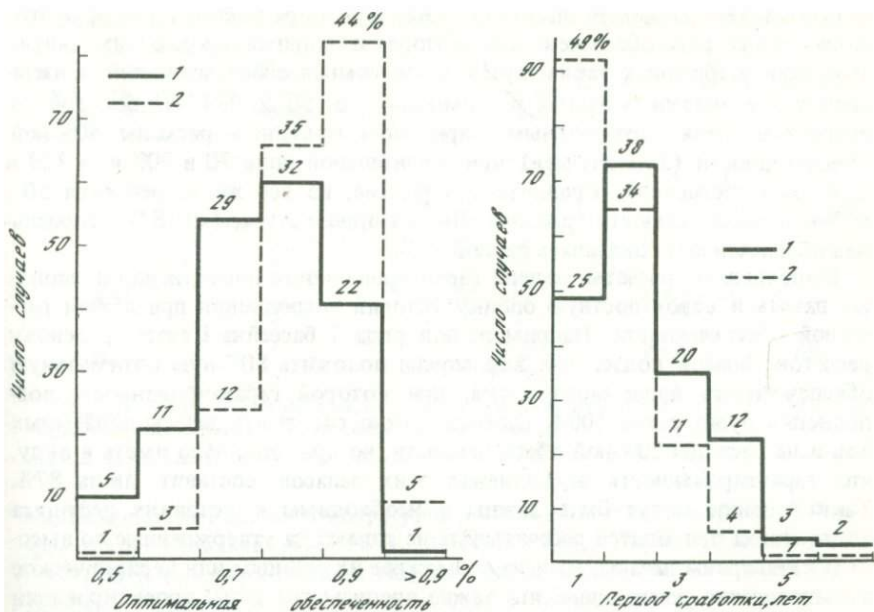


Рис. 52. Гистограмма частот и процент различных оптимальных обеспеченностей подземного стока на территории СССР

1 — эмпирически обобщенные значения; 2 — теоретически рассчитанные значения

Рис. 53. Гистограмма частот и процент различной возможной продолжительности периодов сработки емкости водоносных горизонтов для оцененной расчетной оптимальной обеспеченности подземного стока.

1 — эмпирически оцененные значения; 2 — теоретически рассчитанные значения

летние составляют 20% от общего числа серий). При уменьшении значения обеспеченностей от 0,7 до 0,5 отмечается общая тенденция к постоянному увеличению числа многолетних маловодных периодов и значительное уменьшение числа короткопериодных (1–2-летних) серий маловодных лет. Так, например, при оптимальной обеспеченности 0,6 вероятность появления однолетней серии в 2 раза меньше, чем 4-летней. Следует отметить, что при уменьшении оптимальной обеспеченности растет спектр длиннопериодных маловодных серий.

В сумме по территории СССР чаще встречаемые максимально возможные маловодные периоды 2-летние для эмпирически оцененных оптимальных (рис. 52) значений обеспеченностей и однолетние для таковых, рассчитанных теоретически (рис. 53). Во всех случаях вероятность появления продолжительных (свыше 4 лет) маловодных периодов крайне мала, что видно из представленного гистограммы.

Проведение подобного анализа, таким образом, позволяет определить как наиболее вероятную, так и максимально возможную продолжительность маловодных периодов, на которые можно планировать сработку емкости водоносных горизонтов.

3. Процент гарантированности восполнения в подавляющем большинстве случаев закономерно растет от низких обеспеченностей (50–60%) к

высоким (80–100%) и достигает 100% при определенной для каждого конкретного ряда обеспеченности, которая и принималась за оптимальную. Вариации выбранных таким путем оптимальных обеспеченностей подземного стока оказались весьма различными — от 50 до 95%. Наиболее часто встречающимися оптимальными при этом оказались расходы 80%-ной обеспеченности (32% случаев) при значительной доле 70 и 90%-ных (29 и 22% соответственно). Сравнительно редкие, но все же встречаются 50–60%-ные обеспеченности (рис. 54). Лишь в одном случае (из 187) оптимальная обеспеченность оказалась равной 95%.

Выполненные расчеты степени гарантированности восполнения позволяют давать и вероятностную оценку условий восполнения при любой расчетной обеспеченности. Например, для ряда 1 бассейна Печоры в основу расчетов запасов подземных вод можно положить 80%-ную оптимальную обеспеченность подземного стока, при которой гарантированность восполнения будет равна 100%. Однако можно рассчитать запасы подземных вод и на расходы 70%-ной обеспеченности, но при этом надо иметь в виду, что гарантированность восполнения этих запасов составит лишь 87%. Такие оценки могут быть важны и необходимы в условиях дефицита воды, когда приходится рассчитывать не только на утвержденные по высоким категориям запасы, но и на возможное их сезонное или периодическое за многолетие увеличение, что важно предусмотреть при проектировании сечений трубопроводов от водозаборов к потребителям.

Кроме того, в основу оценки степени гарантированности восполнения запасов подземных вод могут быть положены предусмотренные инструкцией Государственной комиссии по запасам полезных ископаемых (ГКЗ) дифференцированные данные обеспеченности водоснабжения, определяемые степенью важности объекта, крупностью города или необходимостью поддержания бесперебойности снабжения того или иного производства водой. При этом выбор расчетных расходов подземного стока должен производиться не по его обеспеченности, которая сама по себе не говорит ни о продолжительностях маловодных лет и их чередовании, ни об условиях восполнения запасов подземных вод, а по гарантированности восполнения запасов подземных вод, выраженной в процентах и рассчитанной для величин подземного стока различной обеспеченности. Пример такого расчета приведен для бассейна р. Тобол, имеющего 80-летний ряд наблюдений. Результаты расчетов, сведенные в табл. 10, показывают, что при 100%-ной гарантированности восполнения за основу оценки эксплуатационных запасов подземных вод можно принять подземный сток 85%-ной обеспеченности, а для 90%-ной гарантированности восполнения можно брать подземный сток 84%-ной обеспеченности.

4. Возможность восполнения сработанных запасов подземных вод (в объемном выражении) в последующий многоводный период может быть оценена на каждом конкретном участке в зависимости не только от продолжительности многоводного периода и возможного питания подземных вод в это время, но также и в зависимости от возможных особенностей погодных условий и особенностей гидрогеологического строения территории. Так, величины питания подземных вод за счет инфильтрации атмосферных осадков или паводковых вод зависят не только от фильтрационных свойств зоны аэрации, но и продолжительности инфильтрации,

Таблица 10

## Гарантированность выполнения подземного стока для бассейна р. Тобол

Расчетная обеспеченность подземного стока	Длина и количество серий		Гарантированность выполнения
	маловодных	многоводных	
0,90	$\frac{1}{2}; \frac{2}{1}$	$\frac{4}{1}; \frac{17}{1}; \frac{27}{1}$	$P = \frac{3}{3} \cdot 100 = 100\%$
0,87	$\frac{1}{2}; \frac{2}{1}$	$\frac{4}{1}; \frac{17}{1}; \frac{27}{1}$	$P = \frac{3}{3} \cdot 100 = 100\%$
0,85	$\frac{1}{3}; \frac{3}{1}$	$\frac{3}{1}; \frac{12}{1}; \frac{27}{1}$	$P = \frac{4}{4} \cdot 100 = 100\%$
0,83	$\frac{1}{4}; \frac{5}{1}$	$\frac{2}{1}; \frac{3}{1}; \frac{6}{1}; \frac{12}{1}; \frac{17}{1}$	$P = 1 \cdot \frac{5}{6} \cdot 100 = 85\%$

Примечание. В числителе — длина серий, в знаменателе — количество серий, годы. Расчетная обеспеченность дана в долях единицы.

увлажненности с осени, температурных условий весеннего периода и других факторов [Ковалевский, 1974; Сычев, 1976; Коноплянцев, Семенов, 1979]. Эти условия от года к году меняются весьма существенно, с трудом поддаются прогнозированию, и поэтому такую оценку также следует делать на вероятностно-статистической основе. Для этого необходимо оценивать гарантированность того, что при выбранной расчетной обеспеченности расходов подземных вод их объемы в последующий многоводный период всегда (т.е. в 100% или с заданным уровнем гарантии, например, в 95% случаев) превысят объемы сработанных запасов подземных вод в маловодный период. Эта задача также может быть решена эмпирическим путем на основе анализа длинных рядов наблюдений. Пример такого анализа показан на рис. 54, из которого видно, что при размерах водоотбора, соответствующих подземному стоку 90-, 80- и даже 70%-ной обеспеченности, объемы многоводных серий превышают указанный водоотбор во всех 100% случаев и оказываются больше объемов необходимой компенсации сработки емкости водного баланса.

При водоотборе, соответствующем подземному стоку 60%-ной обеспеченности, выполнение сработанных запасов подземных вод уже в ряде случаев не произойдет. Поэтому при выборе оптимальной для каждого конкретного бассейна обеспеченности подземного стока необходима двухступенчатая оценка оптимальности: по продолжительности маловодных и многоводных серий (по превышению продолжительности многоводных серий над маловодными) и по объемам стока в пределах этих серий (по превышению выполнения запасов подземных вод в многоводные периоды над объемами их сработки в маловодье).

Сопоставление этих двух основных форм обоснования оптимальности размеров водоотбора по различным бассейнам территории СССР показывает, что наиболее жесткий критерий первый, т.е. по продолжительности серий. В подавляющем большинстве случаев оптимальные обеспеченности, рассчитанные по времени, оказались также оптимальными и (даже с большим запасом) при расчетах оптимальности по объемам. Лишь в отдельных

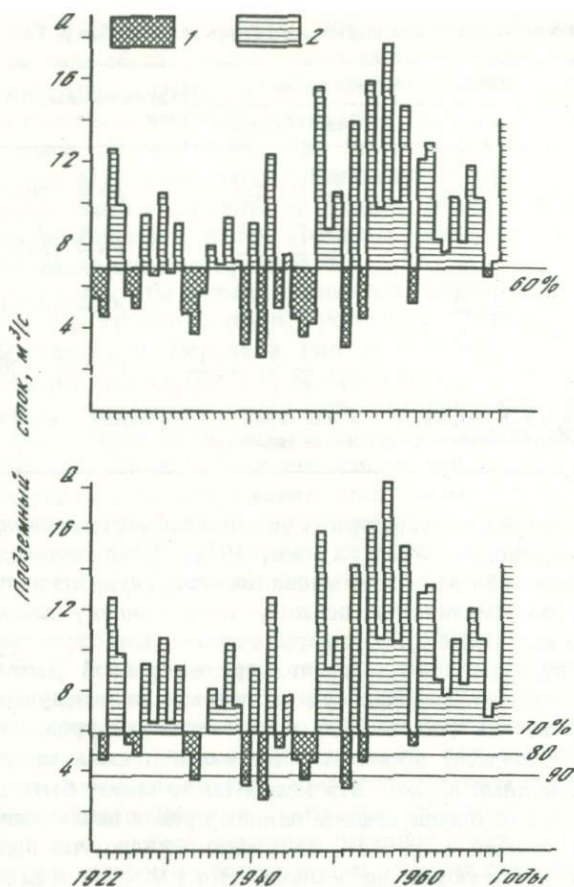


Рис. 54. Соотношение объемов дефицита водоотбора в маловодные периоды и возможной его компенсации в многоводные периоды для различных обеспеченностей подземного стока в бассейне р. Пярну

1 — объемы дефицита водоотбора (подземный сток меньше планируемого водоотбора), обеспечиваемого за счет сработки емкости водоносного горизонта; 2 — объемы подземного стока, превышающие планируемый водоотбор

случаях при низких оптимальных обеспеченностях по времени (квантили 0,5–0,6) обеспеченности восполнения по объемам не отмечалось. Всего в 29 случаях из 187, т.е. в 16%, не оказалось соответствия между оптимальными обеспеченностями по времени и по объемам, рассчитанными эмпирически, и в 3,5% случаев — при теоретических расчетах. Это говорит о том, что в большинстве случаев оптимальную обеспеченность достаточно определять только по продолжительностям маловодных и многоводных серий. Однако при низких значениях обеспеченностей, возникающих, по-видимому, случайно за счет коротких рядов наблюдений и являющихся мало достоверными, требуется дополнительная проверка на гарантированность восполнения по объемам и уточнение ее теоретическими расчетами, о чем будет сказано далее.

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ОБЕСПЕЧЕННОСТЕЙ ВОСПОЛНЕНИЯ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПО ТЕРРИТОРИИ СССР

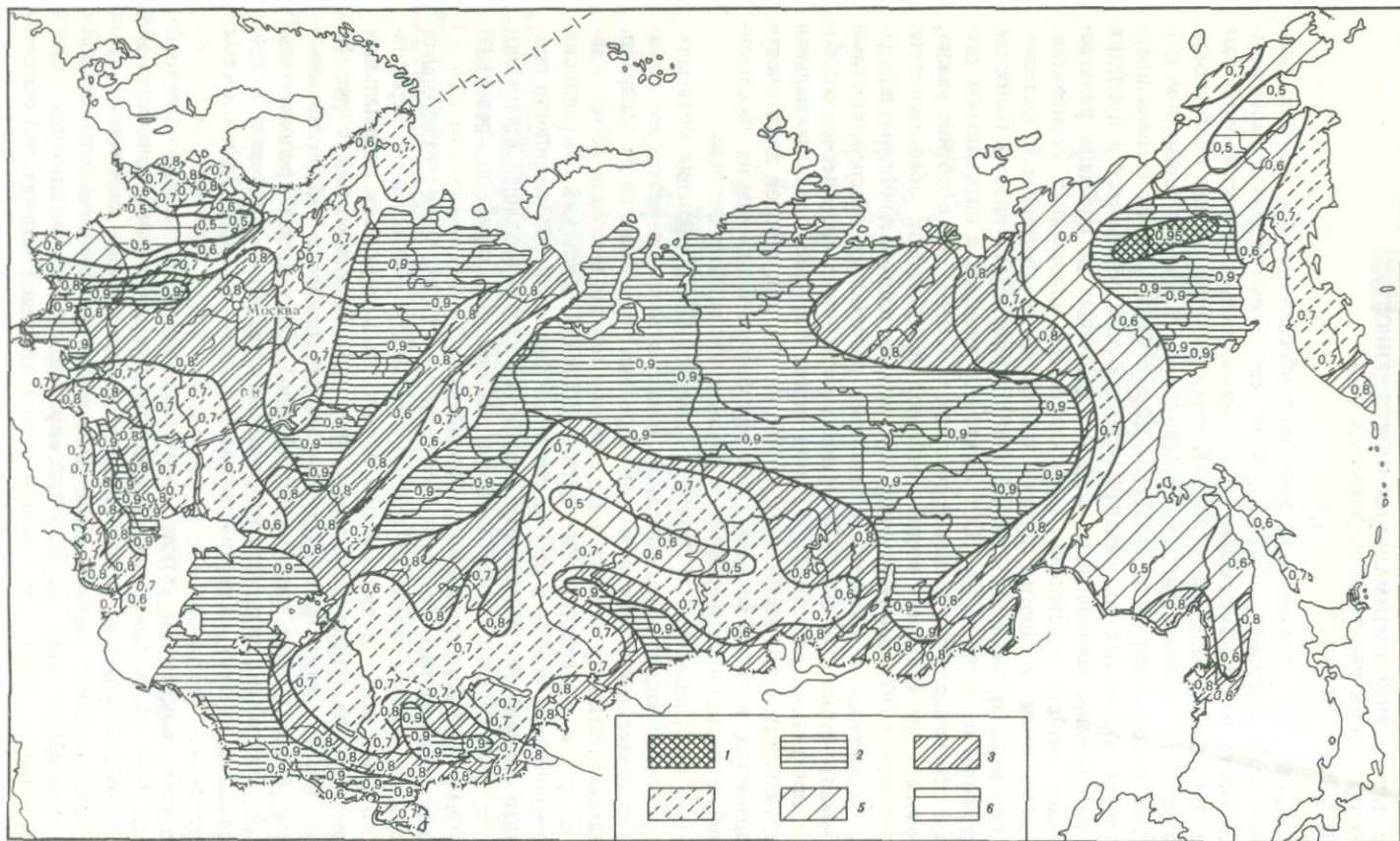
Распределение оптимальных расчетных обеспеченностей ресурсов подземных вод по территории СССР, так же как и многие другие характеристики многолетней изменчивости их режима, оказалось весьма сложным (рис. 55), как бы незакономерным. И это объяснимо, так как особенности многолетней изменчивости режима зависят не только от климатических условий и особенностей атмосферной циркуляции, но и от степени инерционности подземных вод различных водоносных горизонтов в пределах каждого района, зависящей от сильно изменчивых по площади фильтрационных свойств и степени дренированности водоносных горизонтов.

Тем не менее во многих случаях отмечаются не хаотичные, а постепенные переходы от площадей с высокой обеспеченностью к низкой. Наиболее обширными по территории СССР оказались площади с оптимальной расчетной обеспеченностью подземного стока 0,7–0,9 и, что особенно важно, в южных дефицитных водой районах преобладают обеспеченности 70–80%-ная, а 90%-ные обеспеченности развиты лишь на локальных площадях. Ограничены и площади с низкими расчетными обеспеченностями подземного стока (50–60%). Теоретически чем ближе многолетние колебания к правильной синусоиде, тем ниже может быть расчетная оптимальная обеспеченность, приближающаяся к 50%, но так как строгой цикличности в подземных водах не вскрыто, то и вероятность таких низких обеспеченностей низка, что и подтверждается результатами данного анализа.

Более того, несмотря на сложность контуров распределения оптимальных обеспеченностей в региональном плане, отмечается некоторое влияние геологического и тектонического строения территории на их характер. Достаточно четко проявилось здесь влияние горных массивов (Урал, Кавказ и др.) и кристаллических щитов (Карелия, Кольский, Украинский кристаллический массив и др.) на снижение расчетной обеспеченности подземного стока за счет пониженной его инерционности (большей динамичности) и, следовательно, укороченности маловодных серий по сравнению с районами развития артезианских бассейнов.

Также сложно распределены по территории СССР и зоны с различными максимально возможными по продолжительности маловодными периодами, которые могут появиться при оцененных эмпирически оптимальных обеспеченностях подземного стока (рис. 56). Из приведенного рис. 56 видно, что на территории СССР преобладают в целом 2–3-летние маловодные периоды (это как бы общий фон). Сокращение продолжительностей маловодных периодов наблюдается чаще всего в интенсивно дренированных районах, а увеличение, наоборот, — на слабодренировочных территориях.

Выявить какие-либо четкие количественные связи между оцененной оптимальной обеспеченностью и особенностями анализировавшихся рядов наблюдения не удастся. В частности, не удалось выявить корреляционную зависимость между длиной ряда наблюдений и оцененной оптимальной расчетной обеспеченностью. Как при коротких, так и при длинных рядах наблюдений отмечены и высокие и низкие значения оптимальной обеспеченности. Намечается лишь некоторая тенденция к увеличению оптималь-

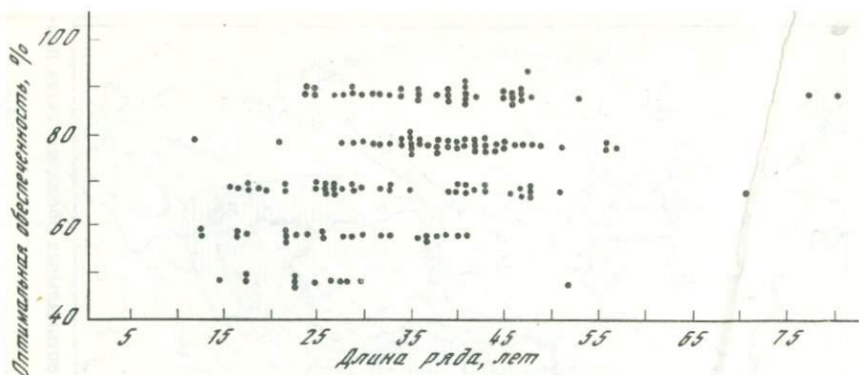


Р и с. 55. Схема распределения эмпирически оцененных оптимальных обеспеченностей подземного стока (вдолях единицы)  
 1 – 0,95; 2 – 0,9; 3 – 0,8; 4 – 0,7; 5 – 0,6; 6 – 0,5

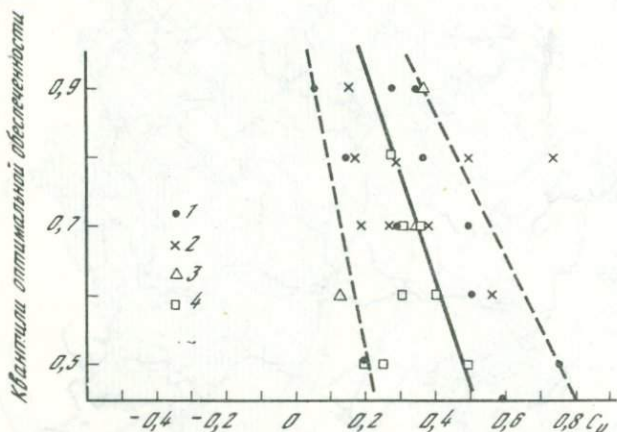


Р и с. 56. Распределение максимально возможных маловодных периодов при оцененных эмпирически оптимальных обеспеченностях подземного стока

1-6 — продолжительность маловодного периода в годах



Р и с. 57. Характер оптимальных расчетных обеспеченностей подземного стока в зависимости от длины ряда наблюдений



Р и с. 58. Зависимость оптимальной обеспеченности подземного стока анализируемых рядов от значений коэффициента вариации ( $C_V$ )

Бассейны вод: 1 – трещинных; 2 – трещинно-поровых; 3 – карстовых; 4 – поровых

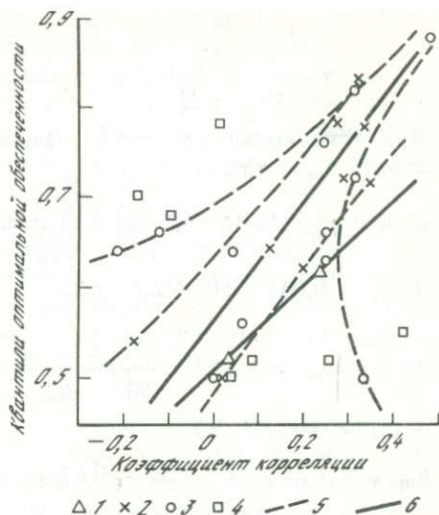
ной обеспеченности при увеличении длины ряда. Этим, возможно, и определена низкая в целом оптимальная расчетная обеспеченность ресурсов подземных вод на крайнем Северо-Востоке СССР, где ряды наблюдений наиболее короткие (рис. 57).

Не установлена определенная зависимость оптимальной обеспеченности от статистических параметров, например, от значения коэффициентов вариации рядов ( $C_V$ ). Можно лишь говорить о некоторой тенденции снижения квантиля обеспеченности при увеличении значения  $C_V$  (рис. 58).

В то же время нами обнаружена четкая зависимость между оптимальной обеспеченностью ( $I$ ) и коэффициентом автокорреляции ( $R_T$ ) рядов подземного стока для различных типов бассейнов подземных вод. Так, для бассейнов трещинных вод и трещинно-поровых вод наблюдается прямая зависимость между оптимальной обеспеченностью и взаимосвязанностью членов ряда подземного стока, т.е. при возрастании значения  $R_T$  возраста-

Рис. 59. Зависимость оптимальной обеспеченности подземного стока анализируемых рядов от степени их внутренней взаимосвязанности (автокоррелированности)

Бассейны вод: 1 — трещинных; 2 — трещинно-поровых; 3 — карстовых; 4 — поровых; 5 — огибающие по точкам 2 и 3; 6 — линии связи по точкам 1—3



ет значение и оптимальной обеспеченности. Криволинейная зависимость указанных величин характерна для карстовых областей территории СССР и только в бассейне поровых вод оптимальная обеспеченность подземного стока совершенно не определена характером взаимосвязи их рядов (рис. 59).

### ОЦЕНКА ОПТИМАЛЬНЫХ ОБЕСПЕЧЕННОСТЕЙ ПО ТЕОРЕТИЧЕСКИМ РАСЧЕТАМ<sup>1</sup>

Кроме приведенного анализа эмпирических рядов наблюдений, были проведены также теоретические вероятностные расчеты как для оценки вероятностей появления числа и длины различных серий маловодных лет, так и для оценки вероятностей различных возможных чередований маловодных и многоводных серий.

Расчет количества серий в выборке производится по формуле [Раткович, 1976]

$$\tau_m = \left(P + \frac{1}{n}\right) \frac{C_{n-m-1}^{np-1}}{C_{np}^{np}}, \quad (26)$$

где  $\tau_m$  — доля каждой серии маловодных лет в выборке (в долях единицы);  $P$  — обеспеченность для определения маловодных серий;  $1 - P$  — обеспеченность для определения многоводных серий;  $n$  — количество членов в выборке;  $m$  — длительность серий, годы;  $C_x^y$  — сочетание из  $x$

элементов по  $y = \frac{x!}{y!(x-y)!}$ .

В качестве примера можно привести расчет количества серий маловодных лет в выборке из 50 членов относительно квантиля обеспеченности 0,7.

<sup>1</sup> Данный раздел написан при участии Г.И. Семькиной.

Доля серий длительностью в 1 год ( $m = 1$ ) в выборке составит:

$$\tau_{m=1} = \left(0,7 + \frac{1}{50}\right) \frac{C_{50-1-1}^{35-1}}{C_{50}^{35}} = 0,72 \frac{C_{48}^{34}}{C_{50}^{35}} = 0,72 \frac{48!}{34! 14!} : \frac{50!}{35! 15!} = 0,154.$$

При этом количество серий маловодных лет длительностью в 1 год составит:  $\theta_{m=1} = \tau_{m=1} n = 0,154 \cdot 50 = 7,7$  раза. Аналогичным образом при

$$m = 2 \quad \tau_{m=2} = \left(0,7 + \frac{1}{50}\right) \frac{C_{50-2-1}^{34}}{C_{50}^{35}} = 0,72 \frac{47!}{34! 13!} : \frac{50!}{35! 15!} = 0,045;$$

$$\theta_{m=2} = 0,045 \cdot 50 = 2,25 \text{ раза};$$

$$m = 3 \quad \tau_{m=3} = \left(0,7 + \frac{1}{50}\right) \frac{C_{50-3-1}^{34}}{C_{50}^{35}} = 0,72 \frac{46!}{34! 12!} : \frac{50!}{34! 15!} =$$

$$= 0,124 = 1,24 \cdot 10^{-2};$$

$$\theta_{m=3} = 1,24 \cdot 10^{-2} \cdot 50 = 0,62 \text{ раза};$$

$$m = 4 \quad \tau_{m=4} = \left(0,7 + \frac{1}{50}\right) \frac{C_{50-4-1}^{34}}{C_{50}^{35}} = 0,72 \frac{45!}{34! 11!} : \frac{50!}{35! 15!} = 0,0032 =$$

$$= 3,2 \cdot 10^{-3};$$

$$\theta_{m=4} = 3,2 \cdot 10^{-3} \cdot 50 = 0,16 \text{ раза}.$$

Вероятность появления в выборке из 50 членов более длительных серий ( $m = 5, 6, 7, 8 \dots$ ) крайне мала, в связи с чем для практических целей подсчет можно ограничить определением количества 4-летних серий.

Вероятностная оценка оптимальной обеспеченности производится подсчетом вероятности события также из предположения о том, что за каждой маловодной серией последует более длительная или равная по продолжительности серия многоводных лет с использованием эмпирически оцененного количества многоводных и маловодных серий в рядах наблюдений за подземным стоком. Данная оценка была произведена отдельно для квантилей обеспеченности 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9. Используя теорему умножения вероятностей, для каждого квантиля было подсчитано произведение вероятностей появления каждого конкретного числа и длины серии маловодных лет с учетом полученных различных величин многоводных серий. Это произведение вероятностей и отражает суммарную вероятность гарантированности восполнения запасов подземных вод, оцениваемую по формуле

$$P = \frac{n_1}{n_{\text{общ}}} \frac{n_2}{n_{\text{общ}}} \dots \frac{n_i}{n_{\text{общ}}}, \quad (27)$$

где  $n_1, n_2, \dots, n_i$  — число маловодных серий длиной  $i$  лет, обеспеченных восполнением;  $n_{\text{общ}}$  — общее количество маловодных серий.

В качестве примера (табл. 11) приведены расчеты по наиболее длинным рядам подземного стока в бассейне рек Чирчик и Тобол. Из табл. 11 видно, что для обоих бассейнов оптимальной обеспеченностью 100%-ной вероятности служит подземный сток 90%-ной обеспеченности. Вероятность восполнения подземного стока 80%-ной обеспеченности составляет соответ-

ственно 78 и 67%. По ряду наблюдений в бассейне р. Тобол отбор подземного стока 60- и 50%-ной обеспеченности вообще никогда не может быть обеспечен 100%-ным восполнением.

Сопоставление результатов теоретически рассчитанных и эмпирически оцененных оптимальных обеспеченностей показало, что совпадение указанных величин наблюдается лишь в бассейне р. Тобол, в то время как в бассейне р. Чирчик вероятность 100%-ного восполнения подземного отбора при квантиле обеспеченности 0,7 составляет всего 53%. Эмпирически же установлено, что при указанной обеспеченности за каждой маловодной серией обязательно следует более длительная или равная по продолжительности серия многоводных лет. Исходя из сказанного следует, что в последнем случае нужно ориентироваться на подземный сток 90%-ной обеспеченности при заданных жестких условиях 100%-ной гарантированности восполнения ресурсов подземных вод.

Опираясь на условие применимости приведенного теоретического расчета оптимальной обеспеченности, допустимого только для независимых случайных величин, нами были отобраны 32 ряда данных по подземному стоку СССР с коэффициентом автокорреляции этих выборок по абсолютной величине меньше  $\pm 0,1$ . Длина этих выборок изменяется от 20 до 50 лет. Проведенные нами расчеты показали, что лишь в семи случаях (21,7%) была отмечена хорошая сходимости теоретических и эмпирических оценок количеств серий различной продолжительности (см. табл. 11). Во всех остальных случаях, как правило, теоретически рассчитанные оптимальные обеспеченности оказались в среднем на 10% выше эмпирических.

Достаточно хорошее совпадение серий маловодных лет, теоретически рассчитанных и эмпирически оцененных, наблюдается по рядам подземного стока в бассейне рек Ена, Пярну, Ахурян, Абакан, Каратал. Следует заметить, что сходимости числа серий маловодных лет наблюдается при длине ряда  $\geq 40$  лет. При меньшей же длине ряда совпадение могло быть и чисто случайным, чем, видимо, и объясняется неудовлетворительность сопоставлений. В остальных 25 случаях наблюдается значительное завышение как числа серий, так и длины эмпирически оцененных серий маловодных лет в рядах годового подземного стока. Теоретические расчеты показали, что относительно любого значения обеспеченности повторяемость серий монотонно убывает, наибольшую повторяемость имеют серии длиной в год. Эмпирически же установлено, что в ряде случаев (подземный сток в бассейнах рек Жуя, Камчатка и др.) при незначительном числе или даже при отсутствии маловодных лет продолжительностью в 1 год наблюдается значительная повторяемость 2-летних и даже 3-летних серий.

Распределение теоретически рассчитанных оптимальных обеспеченностей по территории СССР мало отличается от таковых, оцененных эмпирически (рис. 60). Здесь еще более подчеркивается роль геологии и тектоники. Также сложно распределены и максимально возможные теоретически рассчитанные продолжительности маловодных серий при оптимальных обеспеченностях (рис. 61).

Немаловажным при оценках запасов подземных вод с учетом сработки емкости водоносных горизонтов в маловодные годы становится вопрос и гарантированности того, что после маловодной серии определенной длины последует многоводная не меньшей продолжительности. Ответ

Таблица 11

Определение оптимальной обеспеченности ресурсов подземных вод

Бассейн реки	Длина ряда, (лет)	Эмпирически оцененная оптимальная обеспеченность	Длина лет и количество серий для различных квантилей обеспеченности	
			квантиль обеспеченности	маловодных
Чирчик	70	0,7	0,9	$\frac{1}{6}$
			0,8	$\frac{1}{7}; \frac{2}{2}$
			0,7	$\frac{1}{8}; \frac{2}{3}; \frac{3}{2}$
			0,6	$\frac{1}{8}; \frac{2}{3}; \frac{3}{4}$
			0,5	$\frac{1}{8}; \frac{2}{5}; \frac{3}{3}; \frac{4}{1}$
			0,9	$\frac{1}{2}; \frac{2}{1}$
Тобол	88	0,9	0,8	$\frac{1}{4}; \frac{2}{1}; \frac{5}{1}$
			0,7	$\frac{1}{7}; \frac{2}{1}; \frac{4}{1}$
			0,6	$\frac{1}{7}; \frac{2}{2}; \frac{4}{3}; \frac{9}{1}$
			0,5	$\frac{1}{4}; \frac{2}{4}; \frac{3}{1}; \frac{4}{2}; \frac{5}{1}; \frac{10}{1}$

Примечание. Числитель — длина серии (лет), знаменатель — количество серий.

на этот вопрос также основывается на вероятностных оценках, аналогичных приведенным ранее.

По приведенной ранее формуле в качестве примера было рассчитано математическое ожидание количества многоводных серий относительно квантиля обеспеченности  $1 - P$  по наиболее длинным рядам наблюдений за подземным стоком в бассейне рек Пяру и Тобол. Распределение маловодных и многоводных серий в принятых к обработке рядах и гарантированность восполнения, оцененная по эмпирическим данным и теоретическим расчетам, приведены в табл. 12.

Из данных табл. 11 следует: а) распределение серий маловодных и многоводных лет в рядах подземного стока в бассейнах рек Тобол и Пяру подчинено экспоненциальной функции  $e^{-x}$  (повторяемость маловодных серий относительно квантиля обеспеченности  $P$  почти однозначно соответствует повторяемости многоводных серий относительно квантиля  $1 - P$ ); б) относительно любого квантиля повторяемость маловодных и много-

Длина лет и количество серий для различных квантилей обеспеченности	Определение оптимальной обеспеченности	Теоретически рассчитанная оптимальная обеспеченность
$\frac{7}{1}; \frac{5}{3}; \frac{12}{1}; \frac{20}{1}$	$P = \frac{6}{6} = 1$	
$\frac{1}{2}; \frac{3}{1}; \frac{5}{1}; \frac{6}{1}; \frac{7}{1}; \frac{11}{1}; \frac{12}{1}; \frac{8}{1}$	$P = 1 \cdot \frac{7}{9} = 0,78$	
$\frac{1}{3}; \frac{2}{1}; \frac{5}{1}; \frac{3}{3}; \frac{4}{3}; \frac{12}{1}$	$P = 1 \cdot \frac{10}{13} \cdot \frac{9}{13} = 0,53$	0,9
$\frac{1}{3}; \frac{2}{7}; \frac{3}{4}; \frac{6}{1}$	$P = 1 \cdot \frac{12}{15} \cdot \frac{7}{15} = 0,37$	
$\frac{1}{6}; \frac{2}{7}; \frac{3}{3}; \frac{4}{1}; \frac{6}{1}$	$P = 1 \cdot \frac{12}{17} \cdot \frac{7}{27} \cdot \frac{6}{17} = 0,10$	
$\frac{4}{1}; \frac{17}{1}; \frac{27}{1}$	$P = \frac{3}{3} = 1$	
$\frac{2}{1}; \frac{3}{1}; \frac{8}{1}; \frac{15}{1}; \frac{17}{1}; \frac{18}{1}$	$P = 1 \cdot 1 \cdot \frac{4}{6} = 0,67$	
$\frac{1}{2}; \frac{2}{3}; \frac{3}{1}; \frac{4}{2}; \frac{8}{1}; \frac{11}{1}; \frac{21}{1}$	$P = 1 \cdot 0,8 \cdot 0,6 \cdot 0,4 = 0,19$	0,9
$\frac{5}{1}; \frac{2}{1}; \frac{3}{2}; \frac{4}{2}; \frac{5}{1}; \frac{7}{2}$	$P = 1 \cdot \frac{8}{13} \cdot \frac{6}{13} \cdot 0 = 0$	
$\frac{1}{5}; \frac{2}{3}; \frac{4}{2}; \frac{6}{3}$	$P = 1 \cdot \frac{8}{13} \cdot 5 \cdot 3 \cdot 0 = 0$	

водных серий монотонно уменьшается с ростом их продолжительности; в) сопоставление значений гарантированности восполнения емкостных запасов подземных вод, сработанных в маловодные периоды, позволяет констатировать: близкую сходимость гарантированности восполнения емкостных запасов, определенных методом подсчета вероятности события из предположения о том, что за маловодной серией последует более длительная или равная по продолжительности серия многоводных лет, с использованием эмпирически оцененного количества маловодных и многоводных серий в рядах подземного стока, а также теоретически рассчитанного математического ожидания количества маловодных серий относительно квантиля  $P$  и многоводных серий относительно квантиля  $1 - P$ . Из-за крайне трудоемких расчетов математического ожидания появления серий маловодных лет относительно квантиля  $P$  и многоводных лет относительно квантиля  $1 - P$  можно использовать для подсчета гарантированности восполнения емкостных запасов подземных вод эмпирически оцененные

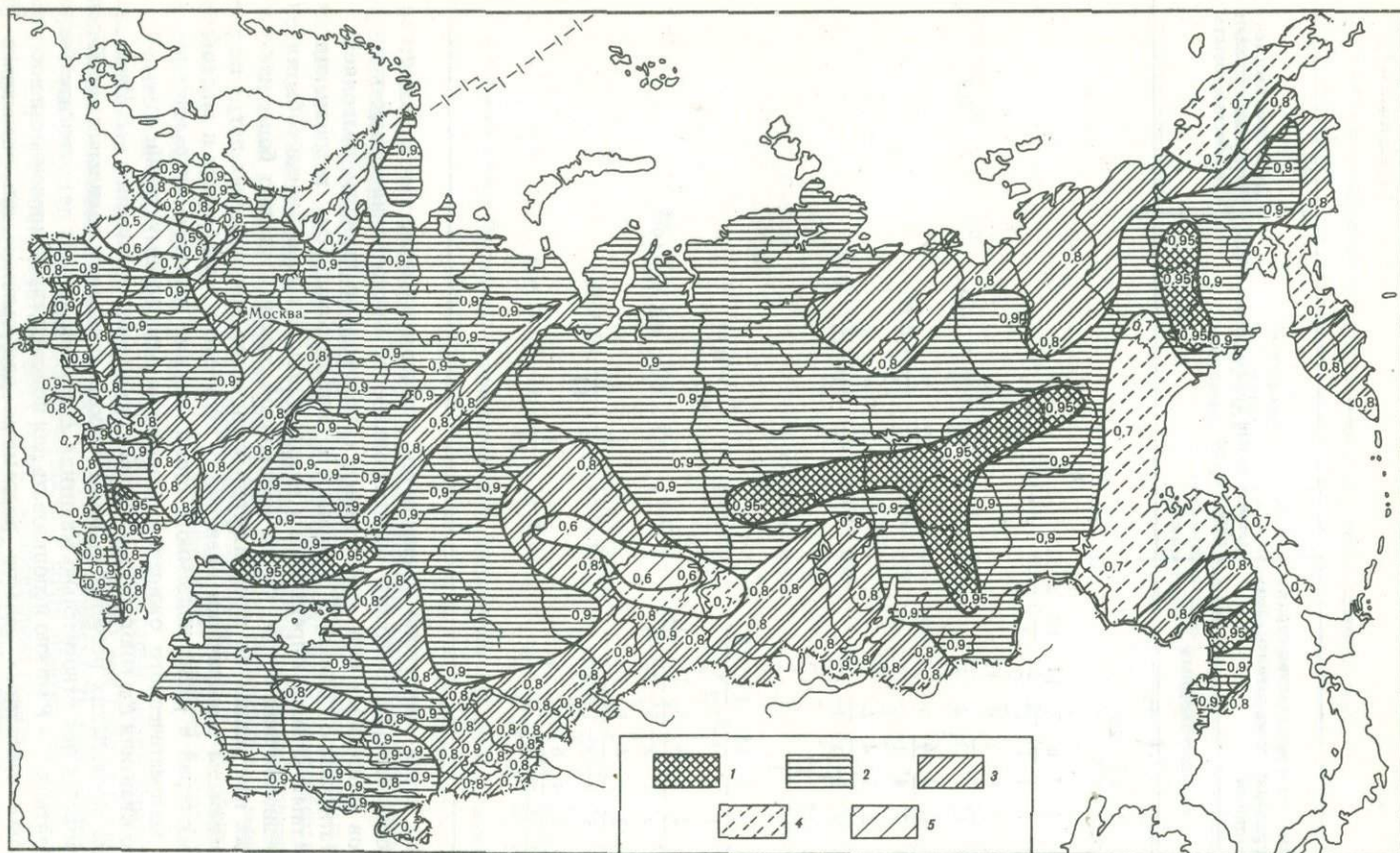


Рис. 60. Схема распределения теоретически рассчитанных оптимальных обеспеченностей подземного стока (в долях единицы)  
 1 — 0,95; 2 — 0,9; 3 — 0,8; 4 — 0,7; 5 — 0,6



Р и с. 61. Распределение максимально возможных маловодных периодов при оцененных теоритически оптимальных обеспеченностях подземного стока

1—3 — продолжительность маловодных периодов, годы

Таблица 12

Количество серий и гарантированность восполнения подземных вод в бассейнах рек Пярун и Тобол

Бассейн реки, длина ряда, лет	$P$	Количество маловодных серий*	$1 - P$	Количество многоводных серий	Определение гарантированности восполнения
Тобол $n = 80$	0,9	$\frac{1}{7}; \frac{2}{1}$	0,1	$\frac{1}{1}; \frac{2}{1}; \frac{3}{1}; \frac{4}{1};$ $\frac{5}{1}; \frac{6}{1}; \frac{7}{1}; \frac{8}{1}$	$P = 1 \cdot \frac{7}{8} = 0,88(1)**$
	0,8	$\frac{1}{10}; \frac{2}{2}$	0,2	$\frac{1}{3}; \frac{2}{2}; \frac{3}{2}; \frac{4}{1}; \frac{5}{1}$	$P = 1 \cdot \frac{9}{12} = 0,75(0,67)$
	0,7	$\frac{1}{12}; \frac{2}{4}; \frac{3}{1}$	0,3	$\frac{1}{5}; \frac{2}{4}; \frac{3}{3}; \frac{4}{2};$ $\frac{5}{1}; \frac{6}{1}; \frac{7}{1}$	$P = 1 \cdot \frac{12}{17} \cdot \frac{8}{17} = 0,33(0,19)$
	0,6	$\frac{1}{12}; \frac{2}{5}; \frac{3}{2}; \frac{4}{1}$	0,4	$\frac{1}{8}; \frac{2}{5}; \frac{3}{3}; \frac{4}{2};$ $\frac{5}{1}; \frac{6}{1}$	$P = 1 \cdot \frac{12}{20} \cdot \frac{7}{20} \cdot \frac{4}{20} = 0,04(0)$
	0,5	$\frac{1}{10}; \frac{2}{5}; \frac{3}{3};$ $\frac{4}{1}; \frac{5}{1}$	0,5	$\frac{1}{10}; \frac{2}{5}; \frac{3}{3}; \frac{4}{1}; \frac{5}{1}$	$P = 1 \cdot \frac{10}{20} \cdot \frac{5}{20} \cdot \frac{2}{20} \cdot \frac{1}{20} = 0,00(0)$
Пярун $n = 50$	0,9	$\frac{1}{4}$	0,1	$\frac{1}{1}; \frac{2}{1}; \frac{3}{1}; \frac{4}{1}$	$P = \frac{4}{4} = 1(1)$
	0,8	$\frac{1}{6}; \frac{2}{1}$	0,2	$\frac{1}{2}; \frac{2}{1}; 3 - 1;$ $\frac{4}{1}; \frac{5}{1}; \frac{6}{1}$	$P = 1 \cdot \frac{5}{7} = 0,71(0,8)$
	0,7	$\frac{1}{8}; \frac{2}{2}; \frac{3}{1}$	0,3	$\frac{1}{3}; \frac{2}{2}; \frac{3}{2}; \frac{4}{1};$ $\frac{5}{1}; \frac{6}{1}; \frac{7}{1}$	$P = 1 \cdot \frac{8}{11} \cdot \frac{6}{11} = 0,40(0,36)$
	0,6	$\frac{1}{8}; \frac{2}{3}; \frac{3}{1}$	0,4	$\frac{1}{5}; \frac{2}{3}; \frac{3}{2}; \frac{4}{1};$ $\frac{5}{1}$	$P = 1 \cdot \frac{7}{12} \cdot \frac{4}{12} = 0,19(0,14)$
	0,5	$\frac{1}{7}; \frac{2}{3}; \frac{3}{2}; \frac{4}{1}$	0,5	$\frac{1}{7}; \frac{2}{3}; \frac{3}{2}; \frac{4}{1}$	$P = 1 \cdot \frac{6}{13} \cdot \frac{3}{13} \cdot \frac{1}{13} = 0,008(0)$

\*Числитель - длина серий (лет), знаменатель - количество серий.

\*\* В скобках дана величина, оцениваемая по эмпирическим данным.

величины количества серий маловодных лет также относительно обеспеченности  $P$  и многоводных лет относительно обеспеченности  $1 - P$  при значениях коэффициентов взаимосвязанности рядов подземного стока, близких к нулю.

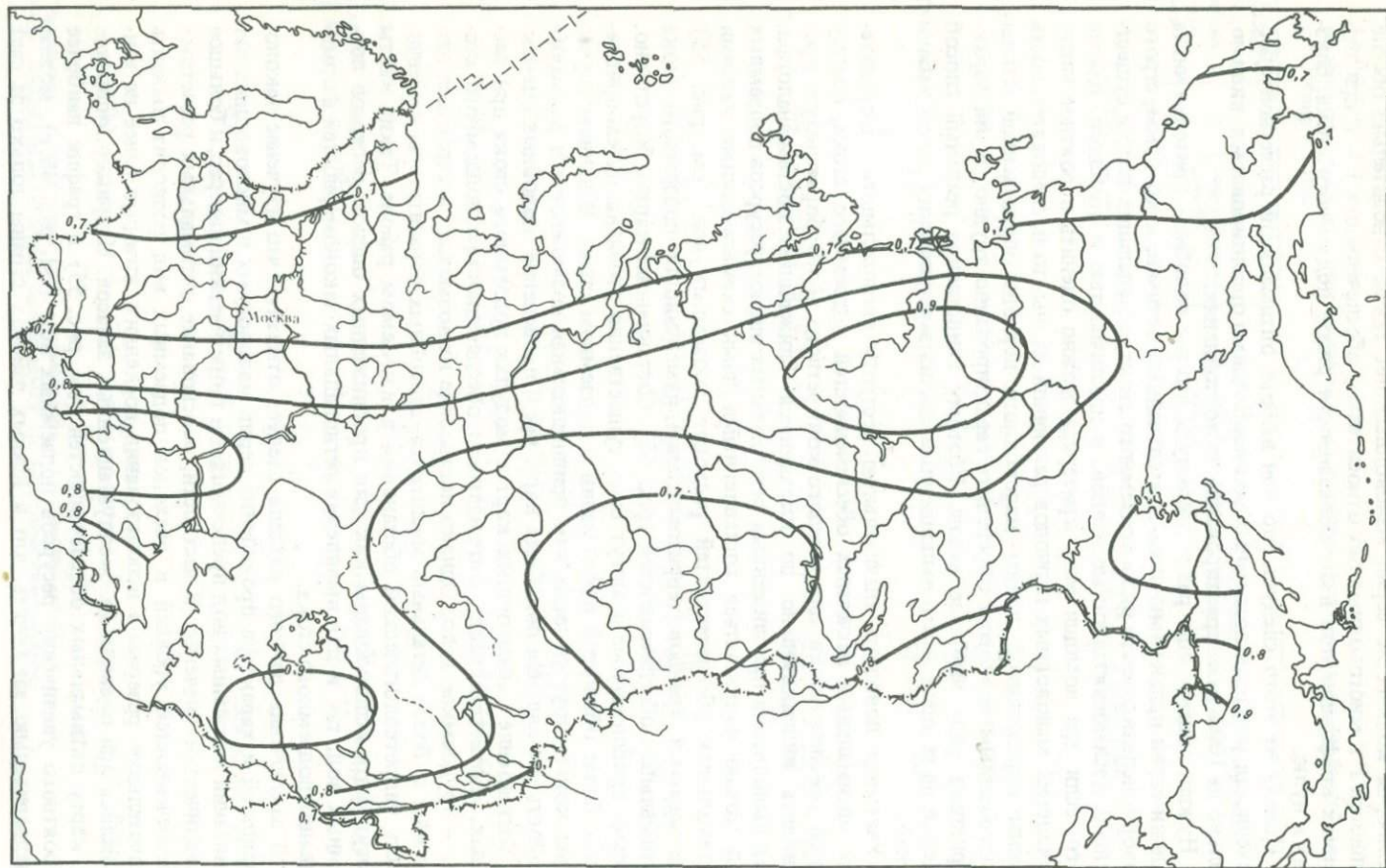
Исходя из этого следует, что при выборе оптимальной расчетной обеспеченности ресурсов подземных вод необходимо ориентироваться, видимо, только на 100%-ную гарантированность восполнения.

Нужно, однако, еще раз подчеркнуть, что все подобные критерии числа и длин серий применимы лишь для случайных величин, к которым, строго говоря, нельзя отнести ряды подземного стока, обладающие часто и существенной взаимосвязанностью членов, и цикличностью и трендами. Кроме того, если при помощи этих критериев можно оценить вероятное число появлений маловодных периодов различной длины, то последовательность смены определенной длины маловодного периода определенной длины многоводным периодом определить гарантированно трудно. А эта характеристика ряда наиболее важна. Поэтому единственно реальный способ оценки на сегодня — это выполненный анализ эмпирических рядов наблюдений.

Учитывая довольно значительную пестроту регионального распределения оптимальных расчетных обеспеченностей подземного стока, оценку такой обеспеченности для каждого конкретного водозабора следует производить индивидуально по имеющимся ближайшим постам-аналогам. Для выполнения приближенных региональных оценок ресурсов подземных вод можно пользоваться составленными нами схематическими картами оптимальных обеспеченностей расходов подземных вод (см. рис. 55) или картами трендов территориальной изменчивости подземного стока оптимальных обеспеченностей (рис. 62). Составленные карты, безусловно, весьма приближенные и могут быть существенно уточнены путем привлечения более обширной информации о подземном стоке. В данном случае нами констатируется лишь как принципиальная возможность и целесообразность составления подобных карт, так и проведение подобных оценок.

Составление аналогичных карт в модулях подземного стока при расходах, соответствующих оптимальным обеспеченностям подземного стока, — трудоемкое дело. Однако построение их возможно, и строиться они должны в более детальных масштабах, способных отразить всю изменчивость гидрогеологической обстановки в изучаемом районе. Такие карты могут быть использованы как для приближенных оценок ресурсов подземных вод, так и для выявления региональных закономерностей формирования подземного стока.

В заключение данного раздела следует отметить, что изучение закономерностей и характера проявлений серий маловодных и многоводных лет в питании подземных вод представляет и теоретический интерес, и большое практическое значение. В частности, обоснование оптимальных расчетных обеспеченностей уровней и расходов подземных вод позволит выявить значительные резервы в использовании последних, которые ранее не учитывались при оценках их эксплуатационных запасов. Например, опираясь на карту оптимальных обеспеченностей (см. рис. 55) и график наиболее вероятного увеличения ресурсов подземных вод (см. рис. 48, е), можно предварительно заключить, что в южных районах страны только за счет



Р и с. 62. Схема оптимальной обеспеченности минимального подземного стока СССР (в долях единицы)  
 0,7–0,9 – изолинии оптимальных обеспеченностей

учета многолетней неравномерности питания эксплуатационные ресурсы подземных вод могут быть увеличены в среднем на 20–30%. Эти резервы могут быть учтены при решении общей проблемы обеспечения водой населения на перспективу, включая обоснование целесообразности и необходимых сроков переброски стока северных рек в южные районы, так как они позволяют определить масштабы возможного удовлетворения потребностей населения южных районов страны в хозяйственно-питьевой воде за счет местных ресурсов подземных вод с учетом их более рационального использования.

Теоретическое значение таких исследований заключается в выявлении пространственно-временных закономерностей режима подземных вод и подземного стока, позволяющих раскрыть законы формирования подземных вод и создать на их основе научно обоснованные рекомендации рационального освоения ресурсов подземных вод.

## Глава 6

### **ПРИМЕНЕНИЕ ГЕЛИЕВОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

Как уже указывалось, проблема оптимального использования ресурсов подземных вод разнообразна и включает учет закономерностей формирования подземных вод, рациональность и экономичность различных форм их использования, а также учет и сведение к минимуму возможных негативных последствий, возникающих в результате эксплуатации подземных вод.

Интенсивная эксплуатация подземных вод далеко не всегда проходит бесследно для окружающей среды. Анализ влияния работы крупных водозаборов на подземные воды неоднократно показывал различные отрицательные экологические эффекты водоотбора: снижение поверхностного стока, осушение озер и болот, гибель и угнетение растительности, просадки земной поверхности и др. Каждый из этих эффектов заслуживает специального рассмотрения для разработки путей прогноза этих изменений во времени и выработки оптимальных форм эксплуатации подземных вод, обеспечивающих при необходимом водоотборе минимум ущерба окружающей среде. В данной главе нами рассмотрен лишь один из таких вопросов — оценка возможности применения гелиевой съемки для изучения взаимосвязей водоносных горизонтов и изменения гидрогеологической обстановки под влиянием активизации карстовых процессов, вызванных интенсивной эксплуатацией подземных вод<sup>1</sup>.

Различные индикаторы и изотопные методы исследований в настоящее время все больше применяются при изучении условий формирования подземных вод и решении разнообразных гидрогеологических задач. Достоинство этих методов заключается в том, что они не нарушают естественного

<sup>1</sup> В изучении данного вопроса принимали участие В.Л. Злобина, Г.И. Семькина и Л.К. Овчинникова.

хода гидрогеологических процессов и в то же время позволяют выявить многие особенности исследуемых гидрогеологических объектов, которые традиционными гидрогеологическими методами определять невозможно или очень трудно (механизм фильтрации подземных вод и взаимосвязи различных водоносных горизонтов, интенсивность водообмена, возраст воды и другие вопросы).

Большинство радиоиндикаторных методов связано с запуском в скважины стабильных индикаторов (красители, химические элементы, споры, различные соли, пыльца, активные и пенящиеся вещества и др.) и радиоактивных изотопов, различающихся по типу, энергии излучения и периоду полураспада [Aulenbach, 1978]. Ввод индикаторов и изотопов в водоносные горизонты, как показывают многочисленные исследования, возможен на локальных участках, что позволяет решать различные практические задачи [Downing, Smith, 1977; Harmon, 1977; Fritz et al., 1978; Payne, Ortiz, 1979; и др.].

В последнее время при гидрогеологических исследованиях широко распространилось комплексное использование одновременно нескольких изотопов. Определились такие сочетания, как тритий (Т),  $C^{14}$ ,  $C^{13}$  и дейтерий [Downing et al., 1979]; дейтерий, тритий и  $O^{18}$  [Payne, Ortiz, 1979]; тритий и фреон-11 [Thompson, Hayes, 1979]; отношения стабильных изотопов, радиоуглерода и трития [Downing, Smith, 1977]; гелий и  $Rn^{222}$ ,  $Ra^{226}$  [Andrews, Lee, 1979]; гелий, аргон, неон, криптон и ксенон [Herzberg, Mazor, 1979] и др.

Среди множества применяемых изотопов, концентрации которых определяются непосредственно в подземных водах, выделяются гелий и тритий. Проведенные в СССР [Якуцени, 1968; Яницкий, 1979; и др.] исследования особенностей распространения гелия в земной коре позволили установить закономерное увеличение содержания гелия в подземных водах по мере увеличения глубины их залегания. Наиболее интенсивно возрастает концентрация гелия при неглубоком залегании кристаллического фундамента. Под влиянием горного давления в результате диагенеза пород гелий как бы выдавливается из недр Земли и с восходящими потоками подземных вод поднимается к ее поверхности, откуда диссипирует в космос. Наиболее благоприятные пути фильтрации гелия — обводненные разломы и гидрогеологические окна, по которым обычно фиксируются аномально высокие концентрации гелия. Особенно интенсивные аномалии отмечаются в местах пересечения разрывных тектонических нарушений. Выявленные закономерности миграции гелия открывают широкие перспективы использования гелиевой съемки для решения различных практических задач, стоящих перед гидрогеологами.

Среди таких задач можно отметить следующие.

1. Оценка степени изолированности водоносного горизонта от смежных горизонтов для обоснования возможностей закачек промышленных стоков или обоснования подсоса некондиционных подземных вод к водозаборам и других целей.

2. Выявление зон повышенной трещиноватости и обводненности для заложения эксплуатационных скважин, а также зон наиболее активной взаимосвязи водоносных горизонтов (зон тектонических нарушений, гидрогеологических фациальных окон).

3. Уточнение генезиса различных типов подземных вод (пресных, минерализованных), минеральных вод и др.

4. Изучение питания подземных вод в зоне затрудненного водообмена, когда обычные наблюдения оказываются мало контрастными и неинформативными.

5. Оценка степени воздействия хозяйственной деятельности человека на подземные воды (изменение величин перетекания или взаимодействия водоносных горизонтов, а также изменение гидравлической связи поверхностных и подземных вод под влиянием эксплуатации последних и др.).

6. Поиски месторождений полезных ископаемых по гидрогеологическим показателям (прежде всего радиоактивных).

7. Изучение взаимосвязей поверхностных и подземных вод и др.

Однако гелиевая съемка — специфический вид гидрогеологических исследований, требующий специального обоснования и апробации, в частности изучения возможности ее применения для оценок влияния водоотбора на окружающую среду, что и входило в задачу наших исследований.

Как известно, такая съемка проводилась до настоящего времени в основном с целью поисков месторождений радиоактивных руд, а также для картирования тектонических разрывных нарушений. Для решения гидрогеологических задач она применялась пока еще в ограниченных масштабах, и в этом направлении были сделаны лишь самые первые шаги. Для правильного внедрения этого перспективного метода в арсенал гидрогеологических методов исследований необходимо изучить механизм и закономерности миграции гелия в подземных водах.

Как уже указывалось, концентрации гелия постепенно возрастают с глубиной по мере приближения к кристаллическому фундаменту. Следовательно, гелий мигрирует из глубинных частей земной коры через осадочный чехол. В воздухе, атмосферных осадках и поверхностных водах концентрации гелия находятся в пределах фоновых значений  $10^6 - 5 \cdot 10^6$  мл/л. В кристаллическом же фундаменте концентрации гелия достигают 5–20 мл/л, т.е. на семь порядков выше. Как известно, в земной коре встречаются два изотопа гелия:  $He^3$  и  $He^4$ . Первый из них космогенный, а второй радиогенный. В процессе водно-гелиевой съемки обычно учитывается суммарное содержание обоих изотопов гелия. Однако учитывая то, что изотопное соотношение  $He^3/He^4$ , имеющее большое теоретическое и практическое значение и требующее особого рассмотрения, изменяется в пределах  $10^9 - 10^4$ , в процессе гелиевой съемки измеряется преимущественно содержание изотопа  $He^4$ .

По модели Рассела скорость образования гелия за счет радиоактивного распада ( $He^4$ ) в земной коре оценивается величиной  $1,02 \times 10^{13}$  см<sup>3</sup>/год. Для существующего распределения концентраций суммарного гелия в осадочном чехле диффузионным путем, по подсчетам И.Н. Яницкого, потребовалось бы время, превышающее возраст Земли. Поэтому наиболее вероятная форма миграции гелия в литосфере — его конвективный перенос с подземными водами. Например, на территории Русской платформы в подземных водах были выделены разнообразные по структуре и интенсивности гелиевые аномалии. При этом перепад концентраций гелия соста-

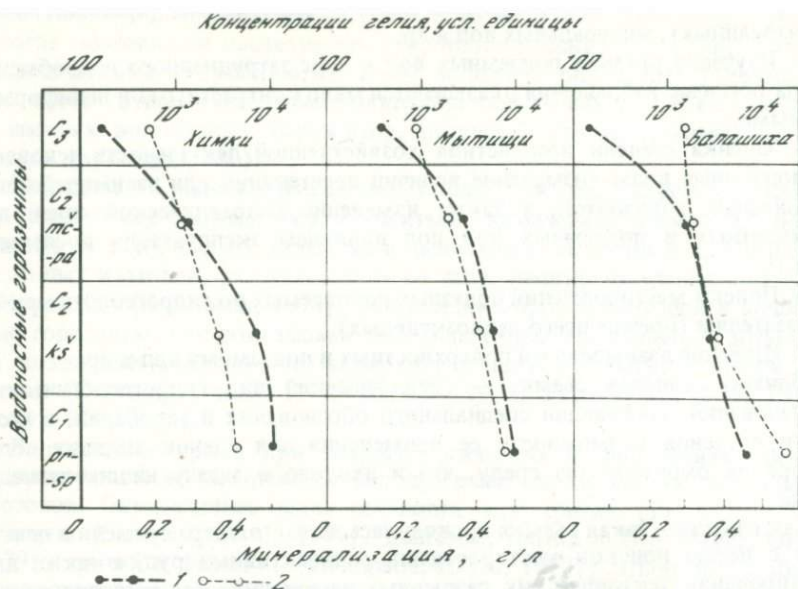


Рис. 63. Графики изменения концентраций гелия и минерализации подземных вод в каменноугольных водоносных горизонтах в Подмоскowie

1 — кривые распределения концентраций гелия; 2 — кривые распределения минерализации подземных вод

вил четыре-пять порядков, что превосходит концентрации других гидрохимических компонентов подземных вод. На рис. 63 приведены кривые изменения концентраций гелия и минерализации подземных вод для каменноугольных водоносных горизонтов Московского артезианского бассейна в сравнительно слабо нарушенных условиях. Аномалии в нормальном для каждого водоносного горизонта поля гелия свидетельствуют о подтоке подземных вод снизу или поверхностных и грунтовых вод сверху. Подток последних проявляется в резком уменьшении концентраций гелия, вплоть до фоновых значений, характерных для поверхностных вод и атмосферных осадков.

Аномально высокие для соответствующих глубин концентрации гелия свидетельствуют, наоборот, о подтоке подземных вод снизу из нижележащих водоносных горизонтов.

Гелий в недрах Земли находится в твердорастворимой атомарной окклюзированной и атомарной свободной форме. Способен к миграции только гелий последней формы. Основная форма миграции свободного подвижного гелия — это фильтрация с подземными водами в растворенном состоянии этого элемента. Содержание гелия фиксируется с помощью керновой, водной и газовой съемок [Яницкий, 1979]. При равноценной информативности эти способы отличаются по производительности. Наиболее эффективным считается вариант съемки по водной фазе (водно-гелиевая съемка).

Преимущество гелия заключается в том, что этот изотоп не радиоактив-

ный и имеет неатмосферное происхождение, и, так как гелий — инертный газ, нет необходимости учитывать распределение этого изотопа в зависимости от гидрохимических реакций, протекающих в водоносном горизонте, как например, для изотопов углерода [Поляков, Селецкий, 1978; Pitman, 1978; Payne, Ortiz, 1979; и др.] .

Апробация гелиевой съемки осуществлялась в районах с естественным и нарушенным режимами подземных вод с использованием данных о родниках и скважинах Крыма, Мацесты и территорий Москвы.

Анализ миграции гелия в естественных условиях производился для выявления закономерностей возможного появления аномалий и гелия в зависимости от рельефа территорий. В соответствии с теорией Гириного—Мятлева разгрузка подземных вод осуществляется преимущественно в долинах рек и в других понижениях рельефа, где напоры подземных вод с глубиной закономерно увеличиваются. На водораздельных же пространствах осуществляется нисходящее движение подземных вод, определяющее закономерное снижение напоров различных горизонтов с глубиной. Принимая конвективную гипотезу переноса гелия с подземными водами, можно предположить, что в соответствии с данной теорией аномалии гелия должны появляться преимущественно под долинами рек и отсутствовать на междуречных пространствах. Однако И.Н. Яницким аномалии гелия отмечались даже на высоких отметках рельефа, что противоречит существующим представлениям, согласно которым на водоразделах в силу нисходящего движения подземных вод аномалии гелия должны "задавливаться" потоком подземных вод. Поэтому возник вопрос о существовании третьей, газово-гравитационной формы миграции гелия, которая могла бы обеспечить движение ("пробулькивание") гелия вверх против нисходящего потока подземных вод. Проверка этой идеи проводилась путем отбора проб воды на гелий вдоль обводненных разломов, секущих как водораздельные, возвышенные части рельефа, так и долины рек в районах Горного Крыма, где наблюдается активная тектоническая деятельность. Пробы отбирались из источников и скважин вдоль Бодракского разлома и других возвышенных территорий Горного Крыма, а также в предгорной и степной частях Северного Крыма. Всего было отобрано и определено непосредственно на месте 40 проб. Работы проводились совместно с Институтом минеральных ресурсов Министерства геологии УССР. Итоги анализа не подтвердили формирования аномалий гелия на водоразделах. На всех возвышенных участках как в песчано-сланцевых отложениях, так и особенно в закарстованных известняках, даже в пределах разломов, подземные воды содержали концентрации гелия, близкие к фоновым, что обусловлено активной нисходящей фильтрацией подземных вод на таких участках.

Аномалии гелия встречены в межгорных впадинах ("Черные воды"), а также вдоль Армянского разлома в Северном Крыму. За пределами последнего разлома в аналогичных орографических и гидрогеологических условиях концентрации гелия были близки к фоновым. Таким образом, данные проведенных полевых работ свидетельствуют о существовании в изученном районе только конвективной формы переноса гелия, а условия развития его аномалий подчиняются теории Гириного—Мятлева.

Отбор проб в районе с. Чехово (Крым) позволил вскрыть аномалию

гелия, вызванную искусственным путем. Концентрация гелия в одной из эксплуатационных скважин резко возросла после ряда лет эксплуатации подземных вод в связи с подсосом подземных вод снизу из более глубоких водоносных горизонтов через плохо затампонированную нефтяную скважину, пробуренную рядом с эксплуатационной неглубокой скважиной. В этой скважине было также отмечено повышение температуры воды. Подобные факты показывают возможность использования гелиевой съемки для изучения степени изолированности или взаимосвязанности водоносных горизонтов в целях охраны подземных вод от загрязнения, для оценки перетекания при расчетах эксплуатационных запасов подземных вод и прогнозов изменения их качества в процессе эксплуатации.

Отбор проб подземных вод для определения растворенного в них гелия в районе курорта Мацеста производился в целях решения дискуссируемого в течение многих лет вопроса о происхождении сероводородных вод этого района. Как известно, существует несколько точек зрения о происхождении лечебных вод Мацесты. Ряд ученых считают, что мацестинские сероводородные воды — это глубинные воды. Существует и такое мнение, что обогащение этих вод сероводородом осуществляется за счет подтока содержащих сероводород глубинных вод Черного моря. Отбор проб на гелий однозначно показал, что мацестинские воды — это глубинные воды, связанные с тектоническими нарушениями кристаллического фундамента. Об этом свидетельствуют высокие, типичные для глубоких водоносных горизонтов концентрации гелия (1,95 — 5,75 мл/л), что на семь порядков выше его фонового содержания, характерного для вод Черного моря. Содержание гелия возрастает с глубиной отбора проб и с увеличением концентрации сероводорода в водах. Кроме теоретического значения, определение содержания гелия в водах Мацесты может иметь и практический интерес для исследования распространения сероводородных вод по площади и глубине, а также для расчетов запасов лечебных вод и определения направления дальнейших их поисков и разведки.

Изучение особенностей проведения водно-гелиевой съемки в условиях нарушенного режима подземных вод осуществлялось в пределах территории Москвы. Целью этих исследований было выявление степени взаимосвязи поверхностных и подземных вод и оконтуривание площадей возможной активизации карстовых процессов под влиянием эксплуатации подземных вод. Интенсивное использование подземных вод, как правило, приводит к существенному переформированию баланса водоносных горизонтов и к снижению пьезометрических уровней ниже уровней рек и грунтовых вод, вызывая тем самым подток агрессивных речных и грунтовых вод в эксплуатируемые водоносные горизонты [Гаврюхина, 1959; Бочев и др., 1966; Попов, 1978; и др.]. Об очевидности формирования новых областей питания подземных вод в каменноугольных отложениях центральной части Московского артезианского бассейна и изменениях в водном и солевом балансах водоносных горизонтов свидетельствуют образовавшиеся гидродинамические, гидрохимические и температурные аномалии [Просенков, 1978; и др.]. Наличие активной взаимосвязи поверхностных и подземных вод подтверждают карты гидроизопьез и гидрохимические данные.

Определение площадей питания и их расположения возможно различны-

ми методами, и в том числе на основе применения цифровых моделей с использованием наблюдений за уровнями подземных вод [Johnston, Leaky, 1977]. Применение подобной методики определения сформировавшихся областей питания в пределах крупного промышленного комплекса, располагающего огромным количеством эксплуатационных скважин в верхне-средне- и нижнекаменноугольных отложениях, весьма трудоемко, так как требует большого количества исходных данных для создания математических моделей. Поэтому возникает необходимость поиска других, менее сложных методов определения и изучения сформировавшихся областей питания.

Появление за последние годы новых карстовых форм на поверхности Земли вызвало интерес к изучению карстово-суффозионных процессов. При этом происхождение новых провалов одними исследователями связывается с карстовыми процессами, другими — только с суффозионными. Поэтому обоснование наличия и активизации карстовых процессов под влиянием интенсивного водоотбора представляет не только методический, но и практический интерес, так как, только выявив истинные генетические причины появления провалов земной поверхности, можно обосновать пути их прогнозирования и предупреждения, а также управления данным негативным процессом. Для решения этого вопроса также были использованы данные водно-гелиевой съемки.

Водно-гелиевая съемка на территории Москвы проводилась 4 раза. Первый раз она была выполнена ВИМСом для средне- и нижнекаменноугольных водоносных горизонтов в 1975 г. Для построения карты по среднекаменноугольному горизонту было использовано 118 скважин и для нижнекаменноугольного — 97 скважин. Диапазон изменения концентраций гелия в подземных водах средне- и нижнекаменноугольных водоносных горизонтов составил  $10^5 - 4,5 \cdot 10^3$  мл/л. Анализ характера распределения концентрации гелия на изученной территории, а также сопоставление полученной картины распределения гелия с фоновыми для данных глубин содержаниями гелия за пределами зоны урбанизации показали существенность изменения водно-балансовой структуры водоносного горизонта. Развитие воронки депрессии в каменноугольных водоносных горизонтах вызвало подток в них не только грунтовых и поверхностных вод, но и вод из нижележащих водоносных горизонтов, что отражается в формировании аномалий гелия как с пониженными, так и с повышенными концентрациями относительно фона.

Уже в 1975 г. в среднекаменноугольном водоносном горизонте выявились две сравнительно небольшие по площади аномалии с довольно низкими концентрациями гелия — около  $2,5 \cdot 10^5$  мл/л (рис. 64). Обе аномалии располагались на площадях развития долин размыва палеореки Москвы, что свидетельствует об интенсивном подпитывании водоносного горизонта из реки. Аналогичная съемка для территории Москвы и отчасти Московской области проводилась ИВП АН СССР трижды (1978 г. — в июне-июле, 1979 г. — в январе-феврале и августе-сентябре). Большое количество использованных эксплуатационных скважин, привлеченных при проведении водно-гелиевой съемки, объясняется тем, что она проводилась в летний период (июнь-июль 1978 г.). В этот период функционировало значительно больше скважин, чем в зимний период съемки 1975 г. Распределение

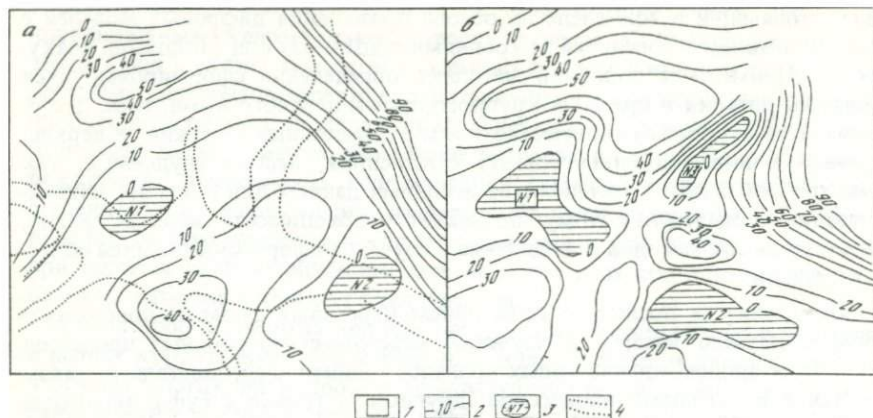


Рис. 64. Распределение концентраций гелия в среднекаменноугольном водоносном горизонте

*a* — по данным 1976 г.; *б* — по данным 1978 г.; 1 — расположение детального участка, для которого распределение концентраций гелия в нижнекаменноугольном водоносном горизонте дано методом автокорреляций; 2 — изолинии концентрации гелия (соответствуют  $n \cdot 10^{-5}$  мл/л); 3 — области низких концентраций гелия и их номера; 4 — контур погребенной долины

концентраций гелия на период 1978–1979 гг. изучалось не только в средне- и нижнекаменноугольном водоносных горизонтах, но и в верхнекаменноугольном. Всего при съемке 1978 г. было отобрано около 310 проб на гелий (11 — для верхнекаменноугольного водоносного горизонта, 191 — для среднекаменноугольного водоносного горизонта, 108 — для нижнекаменноугольного).

Концентрация гелия в пробах воды определялась с помощью высокочувствительного индикатора гелия-ИНГЕМ-1 — прибора мембранного типа, работающего по принципу ионного насоса и позволяющего фиксировать содержание гелия непосредственно в жидкой фазе. Семь диапазонов шкал переключения прибора позволяют измерять содержание гелия в отобранных пробах воды во всем диапазоне встречаемых концентраций гелия от  $5 \cdot 10^{-5}$  до 20 мл/л.

Верхнекаменноугольный водоносный горизонт распространен на исследуемой территории неповсеместно, на ряде участков он вообще осушен в процессе эксплуатации. Поэтому о площадном распределении концентраций гелия в этом водоносном горизонте судить трудно. Можно лишь отметить, что все отобранные пробы воды характеризуются весьма низкими концентрациями этого элемента ( $5 \cdot 10^{-5}$  мл/л), близкими к фоновым.

Проведение повторной водно-гелиевой съемки для среднекаменноугольного водоносного горизонта в 1978 г. показало расширение ранее вскрытых аномалий в пространстве и даже появление новой аномалии 3 (см. рис. 64), что свидетельствует о дальнейшем развитии процесса смешения поверхностных и подземных вод и повышении доли поверхностных (речных и, возможно, грунтовых) вод в балансе горизонта.

В пределах двух других аномалий (1 и 2, см. рис. 64, *a*) отмечалось уменьшение концентраций гелия вплоть до нулевых значений по сравнению с фоновыми.

Сформировавшаяся третья аномалия, как и первые две, также приурочена к долине размыва (см. рис. 64, б).

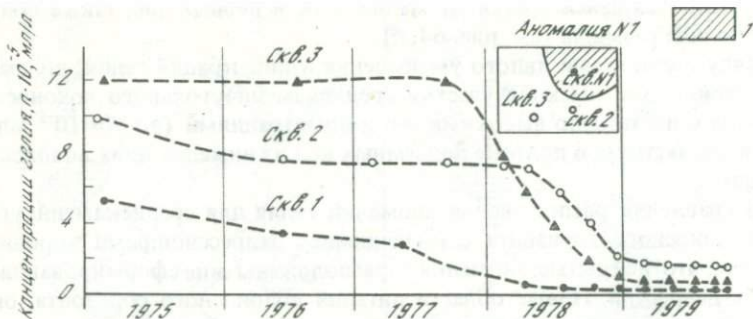
Наряду с участками явного уменьшения концентраций гелия, по сравнению с фоновыми, имеются участки среднекаменноугольного водоносного горизонта с достаточно высокими его концентрациями (до  $90 \cdot 10^5$  мл/л), что свидетельствует о подтоке подземных вод из нижележащих водоносных горизонтов.

При сравнении расположения аномалий гелия для среднекаменноугольного водоносного горизонта с имеющимися депрессионными воронками отмечено, что вскрытые аномалии расположены вне сформировавшихся центров депрессий. Новые области питания водоносного горизонта, контурные по низким концентрациям гелия, приурочены не только к долинам рек, к зонам повышенной трещиноватости среднекаменноугольных отложений, расположенным по потоку от новых областей питания в сторону центров, а также к участкам, где по данным бурения вскрывались карстовые пустоты, т.е. к зонам развития палеокарста.

Для нижнекаменноугольного водоносного горизонта диапазон концентраций гелия составляет  $(0,3 \div 6) \cdot 10^3$  мл/л. По сравнению с распределением гелия в 1975 г. для этого водоносного горизонта в 1978 г. отмечается площадное увеличение зон с низкими концентрациями гелия, что свидетельствует о прогрессирующем омоложении подземных вод. На рис. 65 показан фрагмент поля концентраций гелия для зоны распространения аномалии I в нижнекаменноугольном водоносном горизонте. Прежние зоны максимальных концентраций гелия в нижнекаменноугольном водоносном горизонте характеризуются более значительными концентрациями гелия, что указывает на перетекание подземных вод из девонских отложений, имеющих концентрации гелия до 0,01 мл/л.

Результаты двух последних водно-гелиевых съемок (в 1979 г.) выявили тенденцию к слиянию образовавшихся трех аномалий в среднекаменноугольном водоносном горизонте. Отмеченные изменения концентраций гелия, видимо, могут происходить только в условиях замены больших масс воды при усиливающейся эксплуатации подземных вод по всем изучаемым водоносным горизонтам каменноугольных отложений. При этом в области депрессионных воронок наблюдается увеличение гелиености подземных вод, а в областях питания, — наоборот, уменьшение.

Для выявления сезонной изменчивости содержания гелия по ряду скважин систематически (раз в месяц) отбирались пробы подземных вод среднекаменноугольного водоносного горизонта на участках, в пределах которых наблюдаются карстово-суффозионные явления. Одновременно замерялась температура подземных вод, отбирались пробы на химический состав и агрессивность. На (рис. 65) представлены данные об изменении концентраций гелия за период 1975–1980 гг. Одна из скважин характеризует изменение гелиености непосредственно в выделенной области питания (скв. 1). Две другие расположены вне области низких концентраций гелия (скв. 2 и 3). По данному графику нетрудно увидеть постоянное уменьшение концентраций гелия во времени. Отмечается постоянное увеличение площади аномалии во времени, что свидетельствует об увеличении подтока поверхностных и грунтовых вод и увеличении разбавления вод данного горизонта поверхностными. Отмечена интенсификация этого



Р и с. 65. Режим изменения концентраций гелия во времени  
Заштрихована область аномально низких концентраций гелия

процесса в 1978 г., что связано, видимо, с активизацией карстовых провалов в этом районе, резко улучшивших степень связи грунтовых и напорных вод. Полученные результаты хорошо согласуются с изменениями уровней грунтовых вод в пределах развития аномалий. Снижение уровней на таких площадях достигает 20–30 м [Просенков, 1978].

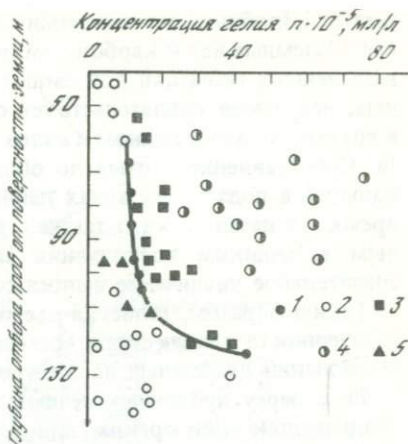
По данным сейсмоакустического профилирования, проведенного МГУ вдоль русла реки, выделены участки нисходящей фильтрации речных вод р. Москвы в пределах этой аномалии, что подтверждает выводы, полученные по гелиевой съемке.

Все имеющиеся эксплуатационные скважины в этом районе можно разделить на три категории: постоянно действующие, периодические и резервные. Для первой категории скважин наблюдается либо неуклонное уменьшение гелиености подземных вод (при их приуроченности к выделенным аномалиям), либо увеличение концентраций гелия за счет подтока подземных вод снизу. Для периодически эксплуатируемых скважин характерно колебание гелиености подземных вод. Например, за полугодовой период концентрации гелия в верхнекаменноугольном водоносном горизонте увеличиваются от  $5 \cdot 10^{-5}$  до  $20 \cdot 10^{-5}$  мл/л. Для среднекаменноугольного водоносного горизонта наблюдалось увеличение концентраций гелия от  $5 \cdot 10^{-5}$  до  $25 \cdot 10^{-5}$  мл/л, что обуславливается сезонностью питания подземных вод и может служить основой оценки величины этого питания. При отборе проб воды из резервных скважин сначала отмечались (при прокачке) концентрации гелия до  $20 \cdot 10^{-5}$  мл/л, а затем концентрация уменьшалась до  $5 \cdot 10^{-5}$  мл/л. Таким образом, увеличение концентраций гелия в водоносном горизонте наблюдается при уменьшении его восполнения грунтовыми и поверхностными водами и за счет подсоса глубинных вод, а гелиеность подземных вод снижается за счет усиления питания сверху.

Изменение концентраций гелия по глубине в пределах Москвы показано на рис. 66. График построен по данным гелиевой съемки как в естественных, так и в нарушенных условиях для скважин, расположенных в интервале глубин от 65 до 123 м, путем многократных измерений в течение лета—осени 1978 г. для среднекаменноугольного водоносного горизонта. Из представленного графика (см. рис. 66) очевидна дифференциация используемых данных. Для областей питания подземных вод все точки

Рис. 66. График изменения концентраций гелия в зависимости от глубины отбора проб для среднекаменноугольного водоносного горизонта

1 — природная кривая для естественных условий; 2 — значения для скважин аномальных участков с низкими концентрациями гелия; 3 — значения для скважин со средними концентрациями гелия; 4 — значения для участков с максимальными концентрациями гелия; 5 — значения гелия для участков с отмеченной активизацией карстовых процессов



сосредоточены слева от кривой, и концентрации гелия занижены из-за разбавления подземных вод грунтовыми и поверхностными водами. Для областей с завышенными концентрациями гелия экспериментальные точки ложатся справа от кривой. На этом же графике показаны значения концентраций гелия для скважин, в которых отмечаются карстовые явления. Данные графика (см рис. 66) также показывают, что естественное поле гелия при интенсивной эксплуатации подземных вод среднекаменноугольных отложений полностью нарушено. При этом нарушение векового поля гелия по полученным данным распространяется до глубин  $> 300$  м, далее наблюдается постоянное увеличение концентраций гелия.

Из анализа степени закарстованности выделенных аномалий видно, что наибольшей закарстованностью характеризуется аномалия 1 (см. рис. 64), в пределах которой отмечены и наименьшие концентрации гелия и наибольшее число форм проявления карстово-суффозионных процессов. Более детальная съемка в пределах аномалии 2 показала, что карстообразование активизировалось здесь не только из-за фильтрации речных и грунтовых вод. Мощный фактор в активизации карста — различные источники загрязнения подземных вод, служащие катализатором карстовых процессов, и в том числе в первую очередь золоотвалы, фильтрация воды из которых приводит, как показали экспериментальные лабораторные исследования, к резкому увеличению интенсивности растворения карстовых пород. Наличие инфильтрации таких вод подтверждают пьезометрические карты и данные о температуре подземных вод: фоновые температуры подземных вод около золоотвалов достигают  $15^\circ\text{C}$  вместо  $7-8^\circ\text{C}$ . Влияние золоотвалов на формирование аномалий подтверждается и гидрохимическими данными.

Следует отметить, что на участках с низкими концентрациями гелия подземные воды характеризуются повышенными значениями минерализации и окисляемости, высоким содержанием хлоридов, магния, кальция, сульфатов, что объясняется подтоком сверху загрязненных грунтовых вод. Для подземных вод этих участков характерны значения рН до 6,5 вместо 8–7,8 т.е. слабощелочная среда превращается в кислую. Выполнен-

ные В.Л.Злобиной термодинамические расчеты по определению агрессивности подземных вод к карбонатам свидетельствуют о превращении в пределах выделенных аномалий подземных вод из ранее неагрессивных в агрессивные, что также свидетельствует о возрастании роли агрессивных речных и грунтовых вод в водном и солевом балансе данного водоносного горизонта. Сопоставление данных по общей минерализации и содержанию солей кальция в подземных водах данного водоносного горизонта в настоящее время и в начале века, а также в речных водах, являющихся сейчас основным источником восполнения запасов подземных вод, показывает на значительное увеличение выноса солей кальция из водовмещающих пород.

Таким образом, гелиевая съемка может косвенно отразить и характер изменчивости химического состава подземных вод во времени, и условия загрязнений подземных вод, и условия активизации карстовых процессов.

Роль переуглубленных речных долин, в пределах которых отсутствуют разделяющие слои юрских глин, в формировании гелиеносности подземных вод среднекаменноугольного водоносного горизонта показана на рис.67.

Таким образом, выделенные аномалии с низкими концентрациями гелия — это современные, сформировавшиеся при инфильтрации поверхностных и грунтовых вод, а зоны с максимальными концентрациями гелия в среднекаменноугольном водоносном горизонте формируются за счет перетекания подземных вод из нижнекаменноугольного водоносного горизонта. При этом изучение химического состава подземных вод средне- и нижнекаменноугольных водоносных горизонтов выявляет идентичность их химического состава на участках взаимосвязи этих горизонтов. Учитывая сложность конфигураций распределения концентраций гелия в пределах водоносных горизонтов, результаты гелиевой съемки 1975, 1978 и 1979 гг. картировались на ЭВМ двумя методами. В первый входило использование программы трендового анализа на языке АЛГОЛ-60. Методом, изложенным в работе Г.М. Великиной, Н.А., Огильви М.С. Красса [1976], была построена на БЭСМ-6 карта трендовых поверхностей, аппроксимируемых полиномами седьмой степени (см. рис. 64). Второй метод включал построение модели поля гелия автокорреляционным методом, предложенным С.П.Сидоркиной [1970]. График, показывающий распределение концентраций гелия на одном из участков детальных исследований в нижнекаменноугольном водоносном горизонте на период 1979 г., построен данным методом (рис.68).

Таким образом, применение водно-гелиевой съемки позволило выявить области низких и высоких концентраций гелия и очертить явные области поступления вод иного состава (очаги инфильтрации и перетекания) и тем самым определить области возможного проявления карстово-суффозионных процессов. Достоверность выделения аномалий подобным способом подтверждена другими независимыми методами, что позволяет считать данный способ перспективным, особенно в тех случаях, когда смешиваемые воды практически идентичны по химическому составу, т.е. когда иным способом их разделить невозможно или очень трудно. В целях подтверждения достоверности результатов, полученных по данным гелиевой съемки, дополнительно была проведена тритиевая съемка.

Применение трития для изучения процессов влагооборота в Советском

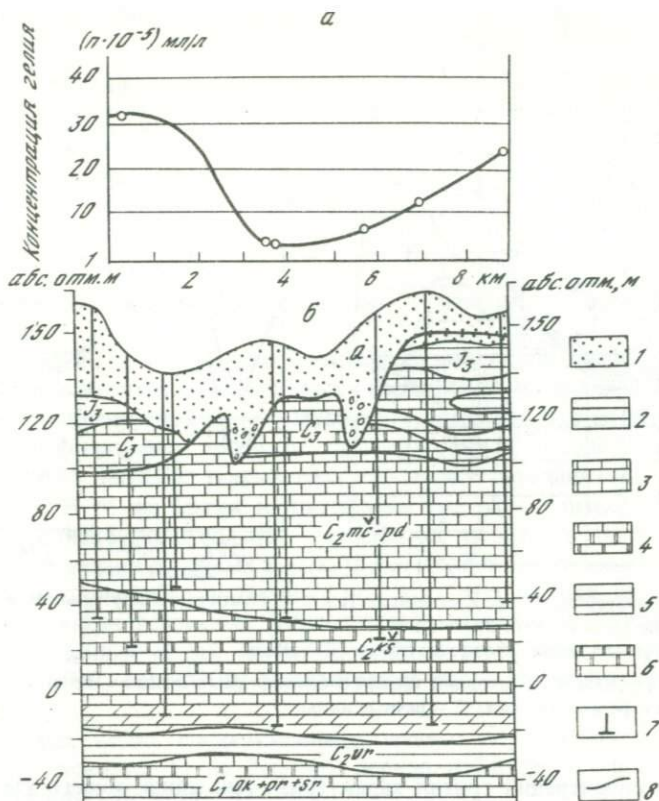


Рис. 67. График изменения концентрации гелия в зависимости от геологических условий

а – профиль концентраций гелия; б – гидрогеологический разрез; 1 – четвертичные отложения ( $Q$ ); 2 – юрские глины ( $J_3$ ); 3 – верхнекаменноугольные отложения ( $C_3$ ); 4 – среднекаменноугольные отложения ( $C_2$ ); 5 – верейские глины ( $C_{2v_p}$ ); 6 – нижнекаменноугольные отложения ( $C_1$ ); 7 – эксплуатационная скважина; 8 – стратиграфическая граница

Союзе начато Д.Н. Финкельштейном [1979], а за рубежом – Даунингом [Downing et al., 1977] и др.

Тритий считается наиболее перспективным среди других индикаторов для зон активного водообмена. Однако широкое применение ограничивается трудоемкостью определения его концентраций и дорогостоящей аппаратурой. Использование трития в полевых условиях сдерживается также в связи с отсутствием портативной аппаратуры для его регистрации.

Достоинство трития состоит в том, что он активно участвует в круговороте воды в природе, благодаря чему снижается вероятность его накопления на отдельных участках местности. Период полураспада трития составляет 12, 26 лет и делает возможным его применение как для относительно длительных (до 20 лет), так и для кратковременных исследований.

Тритий в водоносные горизонты поступает сверху. При этом для распре-

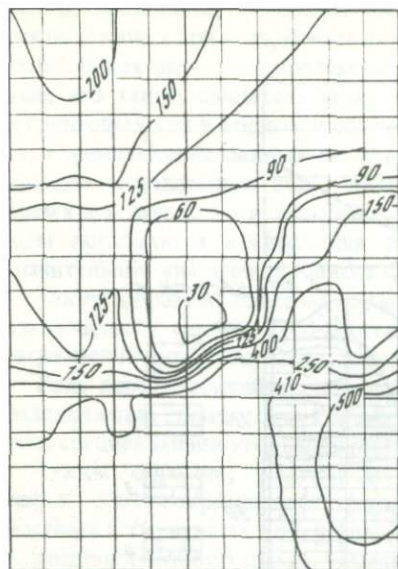


Рис. 68. Распределение концентраций гелия в нижнекаменноугольном водоносном горизонте по методу автокорреляции

Концентрации гелия соответствует  $n \cdot 10^{-5}$  мл/л

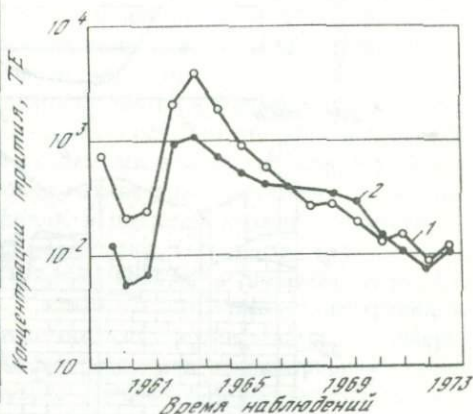


Рис. 69. Графики концентраций трития в атмосферных осадках и в водах р. Москвы  
1 – атмосферные осадки; 2 – речные воды

деления концентраций трития характерна тенденция общего уменьшения концентраций с глубиной залегания подземных вод. Наличие высоких концентраций трития в подземных водах служит показателем пополнения подземных вод речными, грунтовыми водами или непосредственно атмосферными осадками.

Диапазон изменений концентраций трития в различных типах подземных и других природных вод довольно широкий, что создает предпосылки для изучения взаимодействия отдельных звеньев гидросферы (0 – 200 ТЕ).

Значения концентраций трития в атмосферных осадках и речных водах, по данным В.В. Романова, показаны на рис. 69. Пик в графике зависимости концентраций трития от времени наблюдений объясняется тем, что после 1954–1963 гг. подавляющую часть трития в природе составляет искусственный изотоп. Различие концентраций трития в атмосферных осадках, речных водах и подземных водах — это основа, на которой строится исследование трития в подземных водах.

Тритиевая съемка проводилась по более ограниченному количеству скважин, чем водно-гелиевая. Это связано с трудоемкостью определений концентраций трития. Пробы воды отбирались лишь в районах аномалий и для выявления зависимости концентраций гелия и трития.

Концентрации трития определялись В.В. Романовым в ИВП АН СССР на жидкостно-сцинтилляционном спектрометре с предварительным обогащением проб воды электролизом. Приводим результаты этих определений.

Концентрации трития в поверхностных водах в последние годы составляли 120–250 ТЕ.

Водоносный горизонт	Концентрация трития, ТЕ (тритиевые единицы)
C <sub>3</sub>	76 – 112
C <sub>2</sub>	10 – 104
C <sub>1</sub>	2,2 – 18
D	0 – 7,4

Всего в результате тритиевой съемки было измерено свыше 40 проб подземных вод.

Анализ показывает, что концентрации трития в подземных водах верхне- и среднекаменноугольных водоносных горизонтов не превышают его современных концентраций в речных водах, что показывает на непоршневой характер фильтрации воды со стороны реки в водоносных горизонтах и наличие питания подземных вод сверху с различной степенью интенсивности. В то же время концентрации трития в подземных водах верхне- и среднекаменноугольных горизонтов оказались близкими к концентрациям трития в речных водах, что выявляет значительное участие речных вод в пополнении подземных вод этих водоносных горизонтов.

Согласно данным режимных наблюдений за изменением концентраций трития в подземных водах каменноугольных водоносных горизонтов, проведенных ИВП АН СССР, концентрации этого элемента постоянно изменяются.

В подземных водах среднекаменноугольного водоносного горизонта (в пределах аномалии 1) за 2-летний период наблюдений концентрации трития увеличились от 97 до 132 ТЕ.

За этот же период в нижнекаменноугольном водоносном горизонте концентрация трития увеличилась от 2,2 до 8,4 ТЕ. Все это свидетельствует о постоянном обновлении (омоложении) подземных вод за счет подтока поверхностных и грунтовых вод.

Интерпретация данных по тритию основывалась на существовании двух периодов — дотермоядерного и термоядерного. Первый продолжался до 1952–1954 гг., второй начался после 1954 г. В первый период концентрации трития в атмосферных осадках составляли не более 20–30 ТЕ. Во второй период наблюдалось существенное увеличение концентраций Т (см. рис. 69) в атмосфере и поверхностных водах.

Расчеты показывают, что при концентрациях трития, соответствующих дотермоядерному периоду, концентрации трития в подземных водах не должны превышать значений  $4,1 \div 6,6$  ТЕ.

В связи с тем что наибольшее число измерений концентраций (Т) проводилось для среднекаменноугольного водоносного горизонта, время водообмена определялось только для этого водоносного горизонта. На основе модели, отражающие распределение трития в системе атмосферные осадки—поверхностные и подземные воды (баланс воды и трития), при допущении, что средние концентрации трития в среднекаменноугольном водоносном горизонте равны  $48,9 \pm 9$  ТЕ, определено время водообмена водоносного

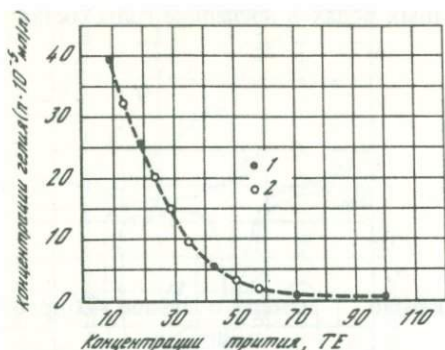


Рис. 70. График связи концентраций трития и концентраций гелия в среднекаменноугольном водоносном горизонте Москвы

1 — экспериментальные значения; 2 — теоретические значения

горизонта, которое составляет 68—14 лет. Для более высоких концентраций трития время водообмена составляет всего 1—2 года тогда как время водообмена в естественных условиях для каменноугольных водоносных горизонтов, по расчетам Ф.М. Бочевера [Бочевер, Ковалева, 1966], соответствовало 85—100 годам.

Совместное применение водно-гелиевой и тритиевой съемки на территории Москвы показало, что минимальным концентрациям гелия соответствуют максимальные концентрации трития и наоборот (рис. 70). При этом в выделенных аномалиях низких концентраций гелия концентрации трития достигают 132 ТЕ, при фоновых значениях концентраций в среднекаменноугольном водоносном горизонте—до 20—30 ТЕ.

Наличие взаимосвязи между концентрациями гелия и трития позволяет по картируемым концентрациям гелия определять и картировать концентрации трития, измерение которых трудоемко, и тем самым оценивать интенсивность водообмена или возраст подземных вод в пределах водоносного горизонта.

Таким образом, комплексное применение гелиевой и тритиевой съемок позволяет оконтуривать области интенсивного водообмена подземных и поверхностных вод в сложных гидродинамических и гидрохимических условиях.

Выявленные аномалии гелия в среднекаменноугольном водоносном горизонте охарактеризованы как зоны наиболее активного водообмена, омоложенные по сравнению с остальными частями водоносного горизонта. Эти аномалии отличаются агрессивностью вод к карбонатам и повышенным содержанием гидрокарбонатов кальция по сравнению с первоначальным составом вод. Все это свидетельствует не только о потенциальной возможности к карстообразованию в пределах таких аномалий, но и о реальном выщелачивании известняков, т.е. выносе солей кальция из водовмещающих пород в процессе фильтрации подземных вод.

Поэтому комплексирование этих двух съемок может оказаться эффективным способом оконтуривания районов проявления наиболее интенсивных карстово-суффозионных процессов и путей фильтрации вод различного возраста, состава и происхождения, т.е. способствовать более полному решению вопросов оптимального использования ресурсов подземных вод.

## ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ РЕСТАВРАЦИИ ДАННЫХ РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД И ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

### СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Одна из важнейших проблем гидрогеологических исследований — это получение достаточно длинных и представительных рядов наблюдений за режимом подземных вод. Такие ряды необходимы для составления достоверных сезонных и долгосрочных прогнозов режима подземных вод, базирующихся на установлении генетических и вероятностно-статистических закономерностей многолетней изменчивости уровней подземных вод и подземного стока как под влиянием только естественных факторов, так и одновременного воздействия естественных и искусственных факторов. Не менее важны, как уже было показано, такие ряды для анализа возможной продолжительности и чередования серий маловодных и многоводных лет, или исследования цикличности в колебаниях уровней, или расходов подземных вод в целях обоснования рационального использования их ресурсов. Длинные ряды наблюдений необходимы и для получения ряда статистических характеристик режима подземных вод (минимальных, максимальных и средних за многолетие значений, дисперсий, взаимосвязанности и др.), широко используемых в практике гидрогеологических работ, проводимых для строительства, водоснабжения, мелиорации земель и др. Решение всех этих задач осложняется малой длиной существующих рядов наблюдений за режимом подземных вод. Поэтому гидрогеологи, так же как и специалисты ряда смежных областей знаний (гидрологи, метеорологи и др.), неоднократно оказывались перед необходимостью наращивания или реставрации имеющихся коротких рядов. Для этой цели используются различные приемы и способы.

1. Установление парной корреляционной связи между анализируемым коротким рядом и длинным рядом-аналогом путем аналитических расчетов или графически. В качестве ряда-аналога используются данные наблюдений за режимом подземных вод в сходных гидрогеологических условиях, эффективных календарных или интегральных атмосферных осадков, режима поверхностных водотоков и других режимообразующих факторов. Данный прием применяется как для получения (наращивания) хронологического ряда, так и для оценок статистических его характеристик или параметров (нормы, дисперсии и др.).

2. Установление множественной корреляционной связи режима подземных вод с серией определяющих его основных режимообразующих факторов.

3. Моделирование рядов методом Монте-Карло на основе статистических характеристик, полученных по коротким рядам наблюдений.

Первые два пути позволяют получить более длинные хронологические ряды наблюдений. Однако для их реализации, в свою очередь, необходимы достаточно длинные ряды наблюдений за процессами-аналогами, которые

нередко весьма ограничены и часто далеко не достаточны для корректного временного их анализа. Третий путь, дающий возможность получить неограниченно длинный ряд значений исследуемого процесса, не позволяет получить хронологический (календарный) ряд, в значительной мере зависит от параметров исходного ряда и поэтому не учитывает в должной мере возможных изменений природных процессов.

Принимая во внимание то, что гидрометеорологические ряды ограничены в лучшем случае небольшим числом десятков лет (чаще всего не более 100 лет), взоры исследователей уже неоднократно обращались к солнечной активности, кольцам деревьев, осадконакоплению и другим процессам, позволяющим реставрировать гидрогеологические ряды наблюдений до 1,5 и более столетий. Этот путь при успешном решении открыл бы широкие перспективы для более достоверного и корректного анализа многолетней изменчивости гидрогеологических процессов, выявления генетических причин, их определяющих, и закономерностей их проявления.

### ПЕРСПЕКТИВЫ НАРАЩИВАНИЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ РЯДОВ ПО ПАЛЕОГЛЯЦИОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Не останавливаясь на сложностях генетических связей режима подземных вод с солнечной активностью, темпами роста деревьев и накопления озерных осадков, что служит предметом особого рассмотрения и освещено в обширной литературе [Токарев, 1962; Эйгенсон, 1963; Шнитников, 1969; Чижевский, 1973; Ковалевский, 1976], нами была поставлена задача оценить возможность использования для рассматриваемых целей палеогляциологических данных. Перспективность палеоклиматических реконструкций на данной основе отмечалась и ранее как зарубежными, так и отечественными исследователями, занимавшимися анализом материалов бурения ледников Гренландии и Антарктиды. Поэтому для решения поставленной задачи необходимо было ответить на следующие ранее нерешенные вопросы, представляющие и теоретический и практический интерес для гидрогеологии.

1. Можно ли получить длинные ряды годовых объемов накопления льда в ледниках без бурения только по данным изучения первичной слоистости ледника?

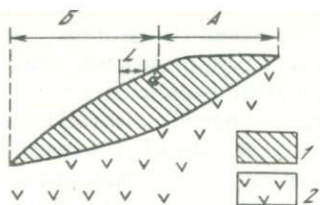
2. Можно ли достоверно датировать слои льда в леднике и составить из них непрерывные ряды фактических данных?

3. Существуют ли достаточно тесные корреляционные связи между многолетней изменчивостью накопления льда в ледниках и многолетним режимом подземных вод или подземного стока, а также с атмосферными осадками?

4. В какой мере режим накопления льда в ледниках отражает изменчивость увлажненности прилегающих горных и предгорных территорий в многолетнем разрезе и может служить основой палеогидрогеологических реконструкций для этих территорий? Существуют ли какие-либо общие закономерности данных процессов?<sup>1</sup>

Исходные методические предпосылки для выполнения данной работы

<sup>1</sup> В исследовании этих вопросов помимо нас приняли участие М.Б. Дюргеров и Г.И. Семякина.



Р и с. 71. Схематический разрез ледника

А — область абляции; Б — область питания (поверхность языка ледника); 1 — годовые слои льда; 2 — подстилающие горные породы

очевидны. Атмосферные осадки в виде снега накапливаются в области питания ледника в течение холодного периода года (9–11 месяцев в году). В короткий летний период снег частично стает, меняет свою структуру, поверхность ледника зачерняется пылью, спорами и пылью растений, фиксируя тем самым годовое накопление снега, который перекрывается свежим снегом очередного холодного периода. Погребенные молодыми слоями снега более древние слои уплотняются, превращаются в фирн, а затем в лед, одновременно совершая нисходящее движение по склону. Таким образом, годовые слои накопившихся осадков (в миллиметрах слоя воды) могут быть замерены по керну скважин, пробуренных на леднике, в трещинах ледника или непосредственно на его поверхности, и рассчитаны по формуле

$$h = L \sin a \cdot \rho \cdot 10, \quad (28)$$

где  $h$  — мощность накопившихся осадков в миллиметрах слоя воды;  $L$  — ширина годового слоя льда по его простирацию;  $a$  — угол падения слоя льда (рис. 71);  $\rho$  — плотность льда ( $\text{г/см}^3$ ).

Основные трудности оценки величин накопленных за год атмосферных осадков и их анализа заключаются в следующем.

1. Невозможность измерения (понимается восстановление за период времени прямым путем величин ежегодной абляции) уменьшения влаги (путем таяния и испарения с поверхности снега, фирна и льда).

2. Нижние слои льда под влиянием вышележащей массы ледника могут существенно деформироваться и сжиматься.

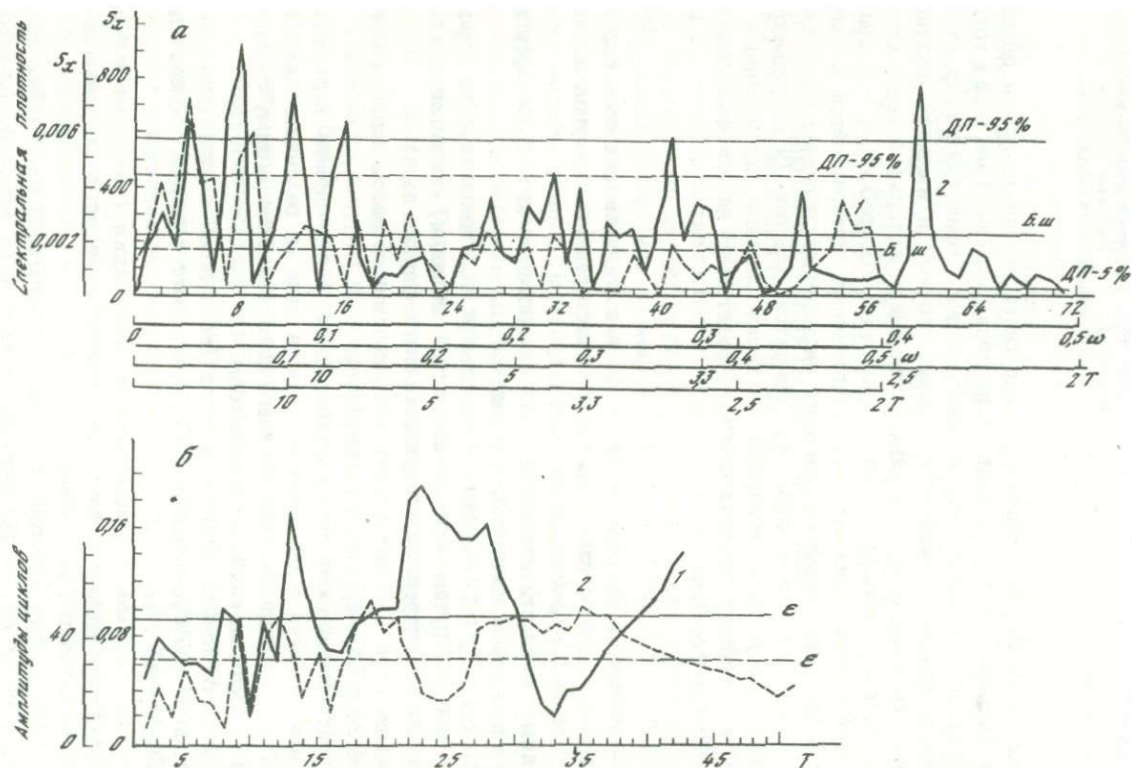
3. Стратиграфическая последовательность слоев может нарушаться дроблением ледника и смещением потоков льда из различных областей питания, а также полным таянием всего накопившегося за зиму снежного покрова в отдельные наиболее теплые годы.

4. Трудности точной датировки слоев (возрастной их привязки) из-за недостаточной разработанности соответствующих методов, обладающих необходимой точностью.

5. В толще льда могут участвовать жидкие осадки (дождевые и талые воды), сформировавшиеся на других участках, но профильтровавшиеся и замерзшие на участке измерений.

6. Жидкие осадки каждого года могут фильтроваться глубже слоя, накопившегося за год, и увеличивать объемы льда, сформировавшегося в предыдущие годы.

Все эти факторы настолько существенны, что пренебрежение ими может сделать поставленную задачу практически не решаемой. Поэтому единственным путем устранения этих трудностей может служить выбор таких объектов изучения, где большая часть из указанных факторов проявляется в



Р и с. 72. Спектрограммы (а) и периодограммы (б) данных по льдообразованию (1) и атмосферным осадкам (2)  
 $\omega$  – частота колебаний 1/год;  $T$  – период гармоника, лет;  $\epsilon$  – математическое ожидание амплитуд процессов 1 и 2; Б.ш. – белый шум;  
 Д.П. – 95%; Д.П. – 5% – доверительные пределы соответственно 95%-ного и 5%-ного уровня значимости

незначительных масштабах, т.е. где их учет не приведет к значительным ошибкам. Принимая во внимание этот факт, объектом исследования был выбран очень простой по строению каровый ледник Кой-Авган, расположенный на северном склоне Центрального Кавказа в верховьях одного из притоков р.Баксан. Ледник находится на высотах 3300 – 3600 м, где абляция невелика. Ледник имеет небольшую площадь (0,36 км<sup>2</sup>), достаточно локализован, с отсутствием ледопадов и небольшой мощности, что снижает вероятность значительных деформаций слоев льда. Локализованность области питания и отсутствие ледопадов исключают смешение льда и определяют классическое, ложкообразное залегание первичных слоев (см. рис. 71). Величина внутреннего питания незначительна, на порядок ниже величины абляции.

Проведенные в течение одного полевого сезона работы, имевшие реконструировочный характер, заключались в замерах ширины годовых слоев льда, четко прослеживающихся на поверхности ледника, и углов падения слоев. Предварительными расчетами, выполненными гляциологическим отрядом МГУ, установлены два реперных слоя, соответствующих 1860 и 1950 гг. Первые работы показали, что в пределах ледника Кой-Авган могут быть получены данные о накоплении льда более чем за 200 лет. В процессе проведенных работ удалось измерить 87 слоев льда, сформировавшихся за период 1863–1950 гг., по которому имеются гидрометеорологические наблюдения. Это позволило использовать полученный ряд гляциологических данных как основу для следующего анализа: установление взаимосвязей режима накопления льда в леднике и атмосферных осадков в Пятигорске и установление взаимосвязей режима накопления льда в леднике и подземного стока в бассейнах рек Подкумок, Шахе, Псекупс, Кума, Белая Арагви, Терек, Белая, Бзыбь.

Парная корреляция льдообразования и атмосферных осадков по хронологическим данным показала низкие, но статистически значимые связи ( $r = 0,25$ ) как с годовыми суммами осадков, так и с осадками холодного периода. Интегральные графики этих характеристик не показали достаточно хорошей сходимости. Это свидетельствует о значительном различии режима атмосферных осадков в отдельных областях Кавказа и необходимости районирования по синхронности режима осадков для выбора районов, где указанные связи могут быть использованы для поставленных целей. Корреляция сглаженных по десятилетиям атмосферных осадков и слоистости льда повышает коэффициент корреляции до 0,52. Следовательно, общая направленность или тенденция в изменении увлажненности на Кавказе все-таки проявляется и в осадках, и в ледниках. Этот вывод подтверждается и данными анализа периодичности льдообразования и выпадения осадков. Методика этого анализа рассмотрена ранее [Ковалевский, 1976]. Так, спектральный анализ величин годовой "чистой" аккумуляции льда вскрыл наличие явных 13- и 26-летних циклов (с соответствующими резкими всплесками спектрограмм над доверительными интервалами 95%-ной обеспеченности, построенными относительно „белого" шума). Периодограммный анализ (по Шустеру) тех же данных также вскрыл 13- и 23-летние циклы (рис. 72).

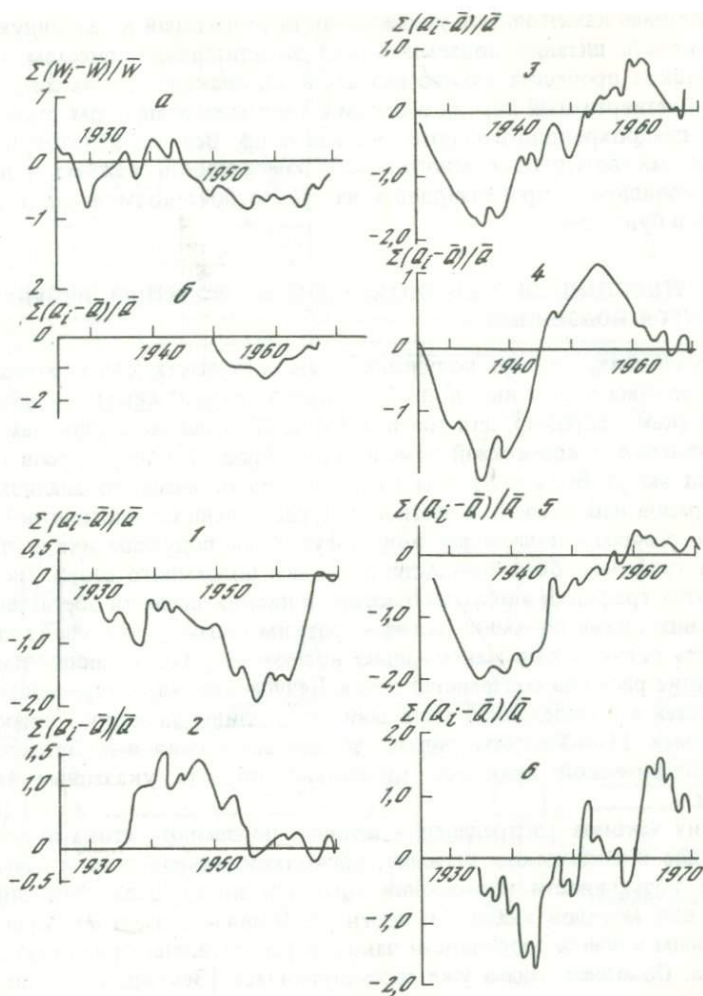
Близкая по продолжительности цикличность установлена и в атмосферных осадках Пятигорска: 12,5-, 17,5-, 25-летние – спектральным анализом

и 9–12- и 19–21-летние циклы – периодограммным анализом. Все это свидетельствует об общих тенденциях в изменении увлажненности данной территории, имеющей наиболее четко выраженную периодичность, кратную 12–13 годам (см. рис. 72).

Связи режима подземного стока по бассейнам 10 рек, указанных ранее, оцененного по минимальным среднемесячным зимним значениям стока рек, с суммарными годовыми атмосферными осадками Пятигорска также не показали высоких корреляционных связей. Лишь по ближайшему к метеостанции бассейну р. Подкумок коэффициент корреляции составил 0,32. Сопоставление интегральных графиков подземного стока и атмосферных осадков показало, что по ряду одних бассейнов рек (Подкумок, Белая Арагви, Ксани, Бзыбь, Терек) эти графики практически синхронны, а по другим (Кубань, Белая, Шахе и Псекупс), наоборот, асинхронны (рис. 73). Различными по знаку оказались и линейные тренды в этих бассейнах. Таким образом, характер многолетней увлажненности Кавказа даже на сравнительно ограниченных территориях существенно неоднотипен, а следовательно, и режим подземных вод также должен быть разнородным. Это свидетельствует о том, что связи режима льдообразования и режима подземных вод могут проявляться, с одной стороны, не повсеместно, а с другой – они могут иметь различные знаки.

Установленная однозначная интегральная направленность режима подземных вод и атмосферных осадков, а также отмеченная идентичность интегральных графиков и цикличности подземного стока, атмосферных осадков и льдообразования с учетом знака многолетней изменчивости (синхронности или асинхронности) позволяют предположить возможность выявления общих тенденций в режиме подземных вод и льдообразования за длительные промежутки времени и получения на этой основе многолетних характеристик изменчивости режима подземных вод и подземного стока.

В заключение следует еще раз подчеркнуть, что рассмотренные результаты исследований представляют лишь первые предварительные итоги, по нашему мнению, нового перспективного направления гидрогеологических исследований. Как показал этот первый опыт, получение достоверных длинных ежегодных хронологических рядов на данной основе затруднено невысокими корреляционными связями изученных процессов. Более реально может быть составлено представление о характере и закономерностях крупномасштабной изменчивости режима подземных вод и подземного стока регионов, прилегающих к ледникам. Однако и такая информация исключительно важна для различного рода гидрогеологических прогнозов, палеогидрогеологических реконструкций и изучения многолетних закономерностей режима подземных вод. Поэтому подобные работы целесообразно продолжать. Наиболее перспективны в этом отношении, по-видимому, ледники Памира, расположенные на абсолютных отметках свыше 4–5 км (особенно фирновые плато, например, такие, как Памирское фирновое плато под пиком Коммунизма), где в силу постоянно низких температур и большого суммарного годового количества атмосферных осадков могут быть замерены истинные объемы накопленных за год льдов без существенных искажений, вносимых абляцией и внутренним питанием ледника, его пластических деформаций, сноса снега ветром и другими факторами.



Р и с. 73. Интегральные нормированные графики атмосферных осадков по Пятигорску (а), родников (б) и подземного стока по бассейнам рек: Ксани (1), Белая Арагви (2), Белая (3), Кубань (4), Шахе (5), Псекупс (6)

Среди задач дальнейшего изучения данной проблемы должно быть повышение точности датировки слоистости льда, а также разработка приемов использования полученной информации для наращивания гидрогеологических рядов. В этом вопросе важно принять во внимание пространственно-временные закономерности изменчивости атмосферных осадков и связанные с ними закономерности питания подземных вод территорий, прилегающих к горным районам (с учетом гипсометрии, степени удаленности территорий от ледниковой области, гидрогеологических условий районов и т.д.). Важно комплексировать подобные исследования с изучением других геологических процессов, способных прямо или косвенно отразить

многолетнюю изменчивость увлажненности территорий и связанную с этим изменчивость питания подземных вод за длительные периоды времени. Среди таких процессов можно назвать осадконакопление за современную эпоху и четвертичный период в целом с учетом микрофлоры, пыльцы, изотопии, дендрохронологического анализа и др. Все это в целом позволит изучить закономерности многолетней изменчивости режима подземных вод в прошлом и прогнозировать на этой основе возможные изменения режима в будущем.

#### ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОЙ МНОГОЛЕТНЕЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

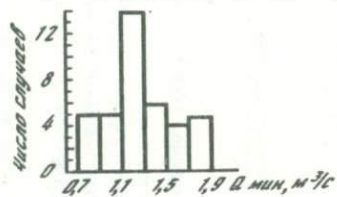
В тех случаях, когда получение хронологических долгосрочных прогнозов режима подземных вод оказывается невозможным или не необходимым (как, например, для обоснования глубин заложения фундаментов), представления о возможной изменчивости уровней или ресурсов подземных вод могут быть получены на основе статистического анализа имеющихся рядов наблюдений. В частности, представления о многолетней изменчивости ресурсов подземных вод могут быть получены и при помощи анализа графиков обеспеченности по рядам подземного стока. Экстраполяция этих графиков в области высоких и низких значений обеспеченности, построенных даже по сравнительно коротким рядам наблюдений, дает возможность оценить как максимально возможные, так и минимальные за многолетие расходы подземного стока. Безусловно, характер кривых обеспеченностей в определенной мере зависит от длины выборки. Однако и по имеющимся 25–40-летним рядам наблюдений можно с достаточной для гидрогеологической практики точностью получить указанные характеристики.

Анализ законов распределения величин подземного стока имеет и определенное методическое значение, поскольку его результаты дают обоснование возможности применения того или иного вида статистических оценок или методов анализа и прогноза. В связи с этим представлялось интересным изучить особенности законов распределения рядов подземного стока. Подобная задача уже рассматривалась [Зекцер, 1977] по 33 рядам. Поэтому для получения более полного ответа на поставленный вопрос были использованы 217 рядов подземного стока, имеющие длину от 10–15 до 40 и более лет. Анализ построенных 217 графиков обеспеченности показал, что распределение величин подземного стока осуществляется по различным законам и, так же как распределение уровней подземных вод [Ковалевский, 1974], может быть охарактеризовано пятью типами кривых.

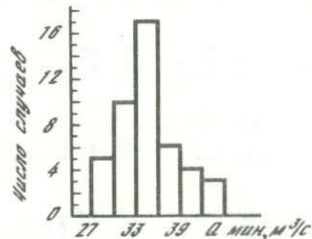
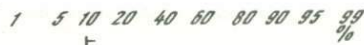
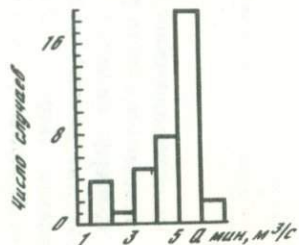
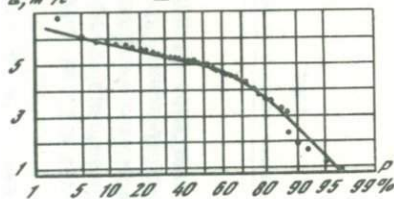
I. Эмпирические точки располагаются на вероятностной бумаге (клетчатке Хазена) по прямой линии или близкой к прямой, что свидетельствует о нормальном законе распределения.

II. Эмпирические точки располагаются в виде вогнутой кривой, которая спрямляется на логарифмической вероятностной бумаге, что свидетельствует о логарифмически нормальном законе распределения.

Р и с. 74. Типы кривых распределения вероятностей и плотностей уровней минимального годового подземного стока



Q, м³/с III



Q, м³/с IV

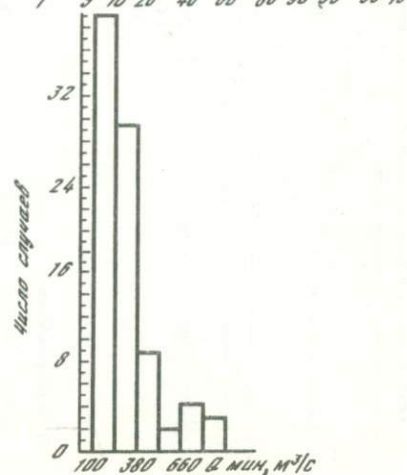
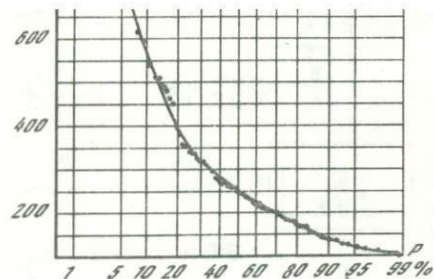
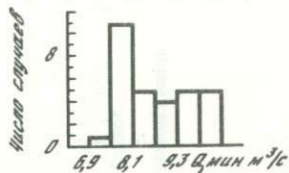
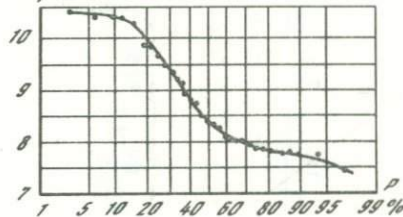


Таблица 13  
Особенности проявления различных типов распределения подземного стока

Тип распределения	Количество рядов	% от общего числа рядов	Длина ряда, лет	Число случаев	% от общего числа случаев	Модуль подземного стока, л/с км <sup>2</sup>	Число случаев
I. Нормальное	34	15,7	>40	10	29,4	>10	2
			30-40	10	29,4	5-10	3
			20-30	10	29,4	2-5	12
			15-20	3	8,8	1,5-2	3
			<15	1	2,9	1-1,5	3
						0,5-1	4
						<0,5	7
II. Логнормальное	12	5,1	>40	3	27,3	>10	-
			30-40	6	54,5	5-10	2
			20-30	2	18,2	2-5	2
						1,5-2	5
			15-20	-	-	1-1,5	-
			<15	1	6,2	0,5-1	2
						<0,5	1
III. Правоасимметричное	16	7,3	>40	5	31,2	>10	1
						5-10	2
			30-40	6	37,5	2-5	6
			20-40	2	12,5	1,5-2	1
						1-1,5	3
			15-20	2	12,5	0,5-1	1
			<15	1	6,2	<0,5	2
IV. Левоасимметричное	106	48,9	>40	30	28,3	>10	3
						5-10	3
			30-40	29	27,4	2-5	11
			20-30	39	18,0	1,5-2	8
						1-1,5	16
			15-20	8	3,7	0,5-1	16
			<15	-	-	<0,5	48
V. Сложное	50	23,0	>40	11	22,0	<10	7
						5-10	1
			30-40	18	36,0	2-5	5
			20-30	17	34,0	1,5-2	2
						1-1,5	8
			15-20	3	6,0	0,5-1	8
			<15	1	2,0	<0,5	19
Всего...	217	100%					

\* В числителе значения величин от максимума до минимума; знаменатель — средняя величина.

III. Криволинейное выпуклое расположение точек, характерное для правоасимметричного распределения.

IV. Криволинейное вогнутое расположение точек, характерное для левоасимметричного распределения, достаточно хорошо аппроксимируемое кривыми Пирсона III типа и трехпараметрическим гамма-распределением по С.Н. Крицкому и М.Ф. Менкелю.

V. Сложное вогнуто-выпуклое распределение (рис. 74).

% от общего числа случаев	$R_{\tau=1}$	Число случаев	% от общего числа случаев	$C_v^*$	$C_s^*$	$C_s / C_v^*$
5,9	>0,6	2	5,9			
8,8	0,4-0,6	5	14,7	$\frac{0,76-0,13}{0,30}$	$\frac{1,64-(-0,81)}{0,42}$	$\frac{4,82-(-6,23)}{0,80}$
35,3	0,3-0,4	34	8,8			
8,8	0,2-0,3	14	41,2			
8,8						
11,8						
20,6	<0-2	10	29,4			
-	>0,6	1	9,1			
18,2	0,4-0,6	3	27,3	$\frac{0,49-0,15}{0,22}$	$\frac{1,72-(-2,06)}{-0,15}$	$\frac{3,51-(-10,84)}{-1,17}$
18,2	0,3-0,4	3	27,3			
45,4						
-	0,2-0,3	1	9,1			
18,2	<0,2	3	27,3			
6,2	>0,6	-	-			
12,5						
37,5	0,4-0,6	4	25,0	$\frac{0,95-0,01}{0,13}$	$\frac{3,11-(-0,75)}{0,17}$	$\frac{11,28-(-40,0)}{-3,32}$
6,2	0,3-0,4	4	25,0			
18,8						
6,2	0,2-0,3	1	6,2			
12,5	<0,2	7	43,8			
2,8	>0,6	6	5,7			
2,8						
10,4	0,4-0,6	16	15,1	$\frac{1,75-0,11}{0,60}$	$\frac{7,83-(-0,42)}{1,37}$	$\frac{45,0-(-0,65)}{3,18}$
7,5	0,3-0,4	15	14,2			
15,1						
15,1	0,2-0,3	25	23,6			
22,1	<0,2	44	41,5			
14,0	>0,6	-	-			
2,0						
10,0	0,4-0,6	9	18,0	$\frac{1,66-0,10}{0,45}$	$\frac{2,77-(-0,77)}{0,29}$	$\frac{5,5-(-6,4)}{0,66}$
4,0	0,3-0,4	8	16,0			
16,0						
16,0	0,2-0,3	14	28,0			
38,0	<0,2	19	38,0			

В табл. 13 приведен анализ ряда показателей, способных определить характер закона распределения подземного стока. Как видно из табл. 13, наиболее распространено левоасимметричное распределение, встреченное почти в половине всех случаев. Значительно реже встречается сложное распределение (23%), еще реже — нормальное (15,7%) и совсем редко — правоасимметричное (7,3%) и логнормальное (5,1%).

Таким образом, вывод И.С. Зекцера о преобладании нормального зако-

на распределения в рядах подземного стока не подтвердился. Ошибочность этого вывода объясняется выбором слишком низкого (70%) уровня значимости при оценке нормального распределения многолетних величин подземного стока. Преобладание в рядах подземного стока левоасимметричного распределения хорошо согласуется с преобладанием аналогичного распределения во всех характеристиках речного стока [Крицкий, Менкель, 1950; Раткович, 1976; и др.].

Как показал анализ особенностей появления того или иного закона распределения величин подземного стока (см. табл. 12), тип распределения не зависит прямо от длины ряда, так как все пять типов кривых наблюдаются при различной продолжительности рядов. Вместе с тем можно отметить, что с увеличением длины ряда число рядов с нормальным распределением несколько растёт, сложные и логнормальные распределения, наоборот, даже несколько уменьшаются, а левоасимметричные преобладают. Поэтому в генеральных совокупностях наиболее вероятно существование левоасимметричного распределения (что хорошо коррелируется с распределением величин речного стока), а также в отдельных случаях — нормального распределения. Геологическое строение и связанная с ним интенсивность питания подземных вод также отражаются в законах распределения величин подземного стока. Так, для сравнительно слабого питания подземных вод (с модулями подземного стока  $0,5-1$  л/с  $\cdot$  км<sup>2</sup>) наиболее вероятно появление левоасимметричных и сложных типов распределения, для относительно хорошего питания подземных вод (с модулями  $1,5-5$  л/с  $\cdot$  км<sup>2</sup>) — нормального, логнормального и правоасимметричного распределения, а для районов с интенсивным питанием подземных вод — сложное и правоасимметричное распределение.

Интенсивность дренированности подземных вод, а следовательно, и степень инерционности их режима также неодинаково влияют на характер закона распределения величин подземного стока. Наименее инерционные с практически некоррелированными внутрирядными связями системы (с  $R_{\tau=1} < 0,2$ ) имеют чаще левоасимметричное, правоасимметричное и сложное распределения. Ряды подземного стока с достаточно реальной внутренней взаимосвязанностью членов ряда (т.е.  $R_{\tau=1} = 0,3-0,5$ ) могут иметь практически любой закон распределения, а с высокой коррелированностью членов ряда ( $R_{\tau=1} > 0,6$ ) — только логнормальный, нормальный и левоасимметричный законы. Этот вывод подтверждается характером многолетней изменчивости режима подземных вод. Ряды с наибольшей изменчивостью во времени (большим  $C_v$ ) имеют левоасимметричное распределение, а наименее изменчивые — правоасимметричное.

Изучение характера распределения значений уровней и расходов подземных вод, генетической его обусловленности может способствовать более обоснованному выбору необходимых заданных экстремальных значений этих параметров, используемых в практике. Поэтому данные исследования требуют дальнейшего развития.

## НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ РАЦИОНАЛЬНОГО И КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕСУРСОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Неуклонный рост водопотребления, с одной стороны, и ограниченность запасов пресных вод, несмотря на их постоянную возобновляемость, — с другой, ставят перед водным хозяйством задачу разработки оптимальных форм рационального использования существующих ресурсов пресных поверхностных и подземных вод. Эта задача как в части всех водных ресурсов в целом, так и подземных вод в частности многоплановая. Она включает, как уже отмечалось ранее, детальный учет имеющихся ресурсов подземных вод, оценку возможного истощения и изменения в процессе эксплуатации восполнения запасов подземных вод, обоснование необходимых мер, направленных на охрану подземных вод, оценку возможных экологических последствий их эксплуатации и обоснование рациональных условий использования, исключающих или снижающих до минимума отрицательные последствия для окружающей среды.

Под оптимальным использованием подземных вод целесообразно понимать водоотбор, не превышающий приходных статей баланса водоносного горизонта как сформировавшихся в естественных условиях, например при каптаже родников, так и трансформированных под влиянием эксплуатации (с учетом привлекаемых ресурсов в районах водозаборных сооружений). Такой водоотбор может существовать неограниченно долго и не приведет к истощению запасов подземных вод. Под истощением запасов подземных вод понимается вызванная превышением водоотбора над восполнением постоянная во времени сработка емкостных запасов подземных вод. В безнапорных условиях истощение запасов подземных вод выражается постоянным во времени снижением уровня и осушением водоносного горизонта, а в напорных на первом этапе — постоянным снижением напоров (сработкой упругих запасов), а на втором — также постоянным осушением пласта.

Далеко не всегда возможна оптимальная эксплуатация подземных вод. Истощение запасов подземных вод может стать неизбежным и даже рациональным, так как за счет сработки емкостных запасов (в сумме с восполнением) может быть организовано водоснабжение довольно крупных городов (на десятилетия). Однако в этих случаях период возможного полного истощения запасов подземных вод должен строго рассчитываться с тем, чтобы по его истечении заблаговременно можно было бы организовать водоснабжение на иной основе. Таким образом, истощение запасов подземных вод может планироваться, и рациональным освоением запасов подземных вод можно считать экономически обоснованное соотношение величин их извлечения и воспроизводства в пределах расчетного срока эксплуатации. Нерациональным в этом случае становится водоотбор, превышающий рассчитанные эксплуатационные запасы, гарантирующие водоснабжение на определенный расчетный срок, так как при этом либо произойдет резкое снижение производительности водозабора в определенный момент, либо

полное истощение запасов подземных вод наступит недопустимо преждевременно. Поэтому эксплуатационные запасы подземных вод служат мерой рационального предела отбора подземных вод из водоносных горизонтов, несмотря на их определенную условность. Эта условность определяется технико-экономическими ограничениями работы водозабора на сегодняшний день, условным выбором расчетного срока работы водозабора, не увязываемого с возможностью принятия альтернативных решений водоснабжения, отсутствием количественных критериев достоверности запасов и др. В связи с этим важной становится детальная оценка существующих ресурсов подземных вод как на локальных участках для проектируемых водозаборов, так и в региональном плане в связи с перспективным планированием использования подземных вод в будущем. Значительные резервы, как уже отмечалось, в повышении детальности таких оценок может дать учет не принимаемых пока во внимание или редко учитываемых следующих аспектов: неравномерности сезонного и многолетнего восполнения ресурсов подземных вод, снижения роли испарения в балансе подземных вод в процессе эксплуатации, более детального учета неоднородности строения водоносных горизонтов в плане и разрезе, сложности конфигураций и изменчивости роли границ во времени, включая процессы перетекания, роли двойной пористости, отжатия воды из глин, изменения степени гидравлической связи подземных и поверхностных вод, использования шахтных, дренажных и возвратных вод. Учет этих аспектов в достаточно полной мере возможен лишь на математических моделях (аналоговых или цифровых).

Руководствуясь принципом единства природных вод, нетрудно предсказать, что подземные воды – это лишь часть общей гидросферы суши. Поэтому любые нарушения в одной из гидравлически взаимосвязанных ее частей неизбежно скажутся и на других. В связи с этим необходимым и важным становится создание комплексных моделей взаимодействия поверхностных и подземных вод, позволяющих оценить все возможные изменения, которые могут произойти в подземных водах при любых нарушениях в поверхностном стоке и наоборот. Такого рода модели уже рассматривались многими исследователями [Епихов, 1978; Злотник, 1979; Freeze, 1972; Wardlaw, Fleming, 1977] и требуют дальнейшего развития для различных природных и водохозяйственных условий. Они позволяют создать единую гидродинамическую модель как для отдельных частей какого-то водосборного бассейна, так и для бассейнов в целом. Примером такой модели в действии служит модель бассейна р. Трент в Англии.

Информация о режиме подземных и поверхностных вод, а также об атмосферных осадках и водоотборе поступает автоматически (по проводам и УКВ-радио) на пульт управления – вычислительную машину, где рассчитываются возможные высоты паводков, их прохождение по реке, строится карта гидроизогипс и оценивается подпор грунтовых вод, изменения запасов подземных вод и др. На основе полученной информации и прогнозов обсчитываются оптимальные варианты регулирования сброса и задержания плотинами поверхностных вод, оперативно выдается информация о возможных катастрофических паводках и подтоплении территорий, определяются возможные водоотборы поверхностных и подземных вод и их влияние на уровни подземных вод. Такой подход к исследованию

водных ресурсов особенно важен в бассейнах с напряженным водным балансом, когда изменение водоотбора подземных вод в районе одного населенного пункта может существенно сказаться на условиях водообеспечения населенных пунктов, расположенных ниже по течению, особенно если все водозаборы в бассейне имеют достаточно тесную связь с рекой.

Дефицит качественных пресных вод ставит задачу усовершенствования и более широкого введения в практику различных форм комплексного использования поверхностных и подземных вод. В настоящее время в практике водного хозяйства СССР и за рубежом уже частично рассматриваются и апробируются следующие схемы комплексного освоения ресурсов поверхностных и подземных вод:

а) подземные воды, как наиболее качественная и дефицитная часть ресурсов пресных вод, используются только для питьевых целей, а поверхностные воды — для технического водоснабжения и орошения; однако эта схема развита еще в крайне ограниченных масштабах, особенно в городах, где создание двух водопроводов (с питьевой и технической водой) связано со значительными капитальными вложениями. Имеются пока лишь ограничения на использование подземных вод для орошения;

б) интенсивная эксплуатация подземных вод водозаборами инфильтрационного типа в водоносных горизонтах, тесно гидравлически связанных с реками, широко используется для magazинирования поверхностного стока и тем самым способствует более полному освоению водных ресурсов бассейнов. Сработка емкостей водоносных горизонтов (аллювия и подстилающих его водовмещающих слоев) осуществляется в межпаводковые периоды, а естественное восполнение сработанных запасов — в паводки. Подобное сезонное подземное регулирование поверхностного стока срезает непродуктивно проходящие паводки, снижает расходы поверхностных вод на испарение (по сравнению с альтернативным решением проблемы регулирования поверхностного стока за счет созданных водохранилищ), улучшает качество поверхностных вод, используемых таким путем для водоснабжения, может быть применено практически повсеместно и дешевле по сравнению со строительством плотин. Особенно эффективна данная форма регулирования поверхностного стока в долинах рек с перидическими пересыхающим и ограниченным по размерам речным стоком. Возможные размеры водооборота оцениваются в зависимости от величин имеющихся емкостных характеристик водоносных горизонтов, величин и продолжительности подземного стока, продолжительности маловодного периода и условий восполняемости сработанных запасов [Биндеман, 1963; Сычев, 1976; Ковалевский, Семькина, 1980];

в) подземные воды используются лишь в качестве резерва для покрытия дефицита в воде в отдельные маловодные периоды. В этих случаях основным источником водоснабжения, требующего больших объемов воды (например, для орошения или водоснабжения городов-гигантов), служат поверхностные воды. Ресурсы же подземных вод служат дополнительным источником, подключаемым либо в самые дефицитные моменты, на короткие промежутки времени, либо ежегодно или вообще в отдельные маловодные годы. Такая кратковременная эксплуатация подземных вод даже при ограниченности их ресурсов позволяет форсированно отобрать значительные количества воды. Восполнение сработанных запасов осуществля-

ется в течение последующих многоводных периодов естественным или искусственным путем за счет поверхностных или подземных вод. Аналогичным образом подземные воды используются в ряде стран (Англии, Франции, Испании) для пополнения поверхностного стока в отдельные маловодные периоды года. Необходимость таких мер определяется соизмеримостью используемого для водоснабжения поверхностного стока с величинами водопотребления в маловодные периоды. Это довольно часто наблюдается в густонаселенных районах, когда в долинах сравнительно небольших рек располагается несколько крупных городов и речной сток почти полностью разбирается в маловодные периоды.

Водозаборы инфильтрационного типа закладываются в этих случаях выше по течению реки от основных потребителей в пределах водоносных горизонтов, обладающих значительной емкостью (с большими геологическими запасами). Расстояние водозаборов от реки выбирается таким образом, чтобы в процессе их кратковременной работы (от нескольких дней до 2–3 месяцев каждый год или только в засушливые годы) ущерб речному стоку оказался минимальным (не более 15% от производительности водозабора). Откачиваемые подземные воды сбрасываются в реку, увеличивая тем самым поверхностный сток и улучшая его санитарное состояние. В последующий многоводный период года осуществляется естественное восполнение сработанных запасов подземных вод за счет поверхностного стока и естественного питания подземных вод. Русло реки в результате служит естественным водопроводом между такого типа водозабором и потребителями.

Увеличенный таким путем поверхностный сток разбирается потребителями сразу (при соответствующей очистке) либо перехватывается инфильтрационными водозаборами. В последнем случае в периоды маловодья рассматриваются возможности полной сработки емкостей водоносных горизонтов с последующим их естественным или искусственным (с использованием нагнетательных колодцев) восполнением в многоводный период. Таким образом, поверхностные и подземные воды рассматриваются как единая водоносная система, взаимное пополнение этих двух частей в различные периоды времени регулируется по необходимости. В настоящее время имеется уже довольно обширный опыт исследований в этой области, направленных на различные аспекты такого использования подземных вод, и в частности: на обоснование оптимального выбора мест заложения водозаборов как с точки зрения получения максимального водоотбора при минимальном ущербе поверхностному стоку, так и снижения затрат на подобную эксплуатацию подземных вод (наибольшей ее экономичности); на изучение возможных потерь речного стока за счет сокращения естественной разгрузки подземных вод и перехвата стока в зоне эксплуатации, а также берегового регулирования (инфильтрации в борта долин повышенного за счет эксплуатации подземных вод по отношению к естественному минимальному поверхностному стоку) — в зоне транзита; на возможные экологические изменения в русле реки за счет смешения вод различного состава [Glover, Balner, 1954; Downing et al., 1974; Wright, 1974; Birtles Wilkinson, 1975; Birtles, 1977; Kemp, Wright, 1977; Custodio et al., 1977]. Объемы существующих восполнений на каждом участке пока невелики: (до  $0,5 \text{ м}^3/\text{с}$ ). Однако отмечается дешевизна подобного пути ре-

шения проблемы водоснабжения, его повсеместная доступность, легкая возможность поэтапного наращивания водоотбора и рассредоточение его по площади водосбора, быстрота ввода в действие, отсутствие негативных последствий и ущерба окружающей среде, и наоборот, оздоровление рек, эффективное и полное использование водных ресурсов каждого бассейна и возможность регулирования их использования во времени в зависимости от изменений условий восполнения поверхностных и подземных вод. Поэтому уже в ближайшее время планируется увеличение восполнений рек в более широких масштабах, например до  $4 \text{ м}^3/\text{с}$  в бассейне р. Темзы [Oweet al. 1977]. Все это свидетельствует об оправданности такого совместного использования поверхностных и подземных вод, создания комплексных моделей взаимодействия поверхностных и подземных вод, позволяющих определить оптимальные объемы форсированного отъема подземных вод для покрытия дефицитов в воде в маловодные годы или сезоны, включая перераспределение ресурсов подземных вод из смежных водосборных бассейнов. Оптимизация использования подземных вод включает в себя также разработку рациональных форм их эксплуатации, в частности обоснование оптимальных конструкций водозаборов, сокращение площадей водозаборов и отводимых под них земель, установление режима водоотбора во времени, комбинирование эксплуатации подземных вод с их искусственным восполнением, а также количественного учета влияния различных объемов водоотбора на окружающую среду. Как уже отмечалось, интенсивная эксплуатация подземных вод оказывает как положительные, так и отрицательные воздействия на ландшафтные условия.

К положительным воздействиям могут быть отнесены: улучшение мелиоративной обстановки на орошаемых и переувлажненных землях; замедление или исключение процессов засоления земель на орошаемых массивах; подтопления земель в зонах влияния каналов и водохранилищ, а также на городских территориях; осушение болот и заболоченных земель; снижение активизации оползневых процессов; регулирование поверхностного стока.

К отрицательным воздействиям могут быть отнесены: переосушение сельскохозяйственных земель и лесных массивов, приводящее к снижению урожайности различных сельскохозяйственных культур, угнетению и гибели растительности (лесов, парков), созданию благоприятных условий для размножения саранчи и самовозгорания торфа, к инверсии родников, осушению прудов и водоемов, имеющих рекреационное значение, к ущербу речному стоку, просадкам земной поверхности. Отмечалась также активизация сейсмической и карстовой деятельности в зонах интенсивного водоотбора, нарушение взаимосвязей поверхностных и подземных вод и ухудшение качества подземных вод.

В связи с этим разработка путей оптимизации использования подземных вод должна базироваться на прогнозировании и минимизации отрицательных эффектов водоотбора на окружающий ландшафт.

Процессы воздействия водоотбора на различные элементы ландшафта и окружающей среды в целом сложны, мало изучены, часто далеки от круга вопросов обычной деятельности гидрогеологов и поэтому требуют особого внимания, детальных комплексных исследований с привлечением специалистов различных профилей, накопления данных соответствующих

наблюдений, вскрытия закономерностей и количественных связей в отмеченных явлениях.

Рациональное использование подземных вод должно предусматривать и систему определенных охранных мер.

1. Изучение режима и ресурсов подземных вод для контроля за истощением запасов подземных вод и обоснования мер их охраны.

Изучение режима подземных вод в целях их охраны от истощения проводится в двух основных направлениях:

а) изучение региональных закономерностей естественного режима подземных вод для определения того фона, на котором развивается нарушенный режим;

б) изучение режима подземных вод в зонах влияния водоотбора для оценки эксплуатационных запасов подземных вод и прогноза возможных изменений гидрогеологических условий и окружающей среды в процессе эксплуатации.

Изучение естественного режима подземных вод позволяет вскрыть многолетние тренды и цикличность в режиме уровней или в восполнении ресурсов подземных вод, установить закономерности чередования маловодных и многоводных лет в питании подземных вод, количественно оценить размеры естественного восполнения запасов подземных вод и дать прогноз его возможного изменения в будущем как под влиянием естественных, так и искусственных факторов. По данным наблюдений за естественным режимом подземных вод могут быть также определены некоторые гидрогеологические параметры, необходимые для оценки запасов подземных вод (водоотдача пород, степень гидравлической связи поверхностных и подземных вод, коэффициенты уровне- и пьезопроводности в зонах подпора рек, инфильтрационное питание и расходы подземных вод на транспирацию, баланс подземных вод). Наблюдательная сеть для изучения естественного режима подземных вод размещается с учетом районирования изучаемой территории по условиям формирования их режима. Такое районирование в зависимости от масштаба исследований может предусматривать подразделение территорий по различию их климата, степени увлажненности или потенциальной интенсивности питания подземных вод, условиям промерзания зоны аэрации и сезонного питания, степени расчлененности рельефа и дренированности подземных вод, геологическому строению и геоморфологическим условиям, глубинам залегания подземных вод и особенностям их баланса [Жоноплянцеv и др., 1963]. Такое районирование служит также основой для экстраполяции данных режима подземных вод с опорных наблюдательных точек на площадь с целью картирования результатов прогноза режима и оценок площадного питания или изменчивости ресурсов подземных вод во времени.

Режим подземных вод в районах проектирования водозаборов или в районах действующих водозаборов изучается с целью определения расчетных гидрогеологических параметров и характера граничных условий в плане и разрезе, для изучения изменчивости во времени качества подземных вод, а также прогноза возможных изменений их количества и качества на расчетный период срока работы водозабора. Наблюдательная сеть закладывается с таким расчетом, чтобы в процессе эксплуатации подземных вод, по данным наблюдений, можно было бы уточнить обобщенные расчетные

параметры и роли границ пластов в формировании их эксплуатационных запасов.

Наблюдения за режимом подземных вод в процессе их эксплуатации служат также контролем соответствия расчетных и фактических эксплуатационных запасов, а также их качества требованиям ГОСТа на питьевую воду. Они служат также основой для выработки своевременных мероприятий, направленных на охрану подземных вод от их истощения и оценки эффективности принятых мер (ограничения или рассредоточения водоотбора, искусственного восполнения, определения оптимального режима водоотбора, учитывающего как режим восполнения запасов подземных вод, так и требования водопотребления).

В задачи специальных служб, созданных для производства таких стационарных наблюдений, помимо наблюдений за изменениями гидрологических условий, должны также входить наблюдения за возможными отмеченными изменениями в окружающей среде и активизацией различных техногенных процессов, вызываемых водоотбором.

2. В число охранных мер должна входить также научно обоснованная система управления эксплуатационным режимом и ресурсами подземных вод, базирующаяся на охарактеризованных ранее комплексных действующих моделях взаимосвязи поверхностных и подземных вод, а также на системе сооружений, регулирующих как поверхностный сток, так и искусственное восполнение запасов подземных вод. Обладая такой системой, можно не только предсказать возможные изменения в режиме и ресурсах подземных вод, которые могут произойти при различных вариантах водоотбора и изменениях естественного питания поверхностных и подземных вод во времени, но и подобрать на модели оптимальную форму эксплуатации поверхностных и подземных вод в складывающихся условиях, а также определить меры, направленные на регулирование водных ресурсов, например, на сокращение водоотбора, усиление искусственного восполнения запасов подземных вод и т. п.

3. Рационализация использования подземных вод требует также усовершенствования водного законодательства страны в части более строгого ограничения использования подземных вод не для питьевых целей, более строгой организации системы контроля за использованием подземных вод, проведения комплексных наблюдений за их режимом в районах эксплуатации, позволяющих уточнять эксплуатационные запасы подземных вод. Необходимы широкое изучение негативных последствий, вызываемых эксплуатацией подземных вод, исключение нерационального их использования в виде сбрасываемых в реки шахтных вод, бесполезно самоизливающихся скважин, не переведенных на крановый режим. Все это требует более строгого выполнения требований ГКЗ по условиям эксплуатации подземных вод и охранным мероприятиям, создания гидрогеологических заповедников, в которых мог бы быть сохранен естественный режим подземных вод как эталон для будущих сопоставлений и оценок возможных искусственных нарушений в их режиме, что имеет большое научное и практическое значение.

## ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Суммируя все изложенное, можно отметить, что выполненные исследования позволили получить ряд новых результатов и выводов как по закономерностям формирования режима подземных вод вообще, так и по способам учета многолетней изменчивости их ресурсов в целях рационального использования в том числе.

1. На основе совместного анализа режима подземных и поверхностных вод разработан новый прием оценки величин подземного стока, позволяющий повысить точность расчетов естественных ресурсов подземных вод, определять сезонную и многолетнюю изменчивость их площадного питания как в естественных, так и в нарушенных условиях. Разработаны и обоснованы рациональные формы представления фактического материала для анализа многолетней изменчивости режима и ресурсов подземных вод.

2. Установлено существование статистически достоверных многолетних линейных и нелинейных трендов как в конкретных, так и в обобщенных региональных характеристиках уровней подземных вод и подземного стока.

Оценены темпы регионального истощения и пополнения ресурсов подземных вод отдельных регионов и территории СССР в целом, выделены районы, где учет многолетних трендов в практических гидрогеологических расчетах целесообразен, охарактеризованы генетические причины появления вскрытых трендов и на этой основе даны рекомендации по возможным формам и заблаговременности экстраполяции трендов на будущее. Региональный анализ и картирование разнонаправленных трендов позволили выявить существующую общую глобальную естественную тенденцию к истощению запасов подземных вод в течение последних десятилетий текущего столетия. Все эти исследования выполнены впервые в СССР и за рубежом и имеют не только познавательное, но и большое теоретическое и практическое значение.

3. Впервые для всей территории СССР исследованы закономерности синхронности и асинхронности режима уровней подземных вод и подземного стока. Охарактеризована существующая асинхронность режима подземных вод в колебаниях различного масштаба — многолетних трендах, интегральной направленности режима, в проявлениях цикличности и ее фазах по территории СССР, а также в ежегодных и короткопериодных многолетних переформированиях региональных аномалий в питании подземных вод на основе серий ретроспективных карт режима их уровней и подземного стока. На базе этого анализа проведено районирование СССР по

синхронности и асинхронности режима подземных вод, показана возможность применения факторного анализа для районирования территорий по особенностям их режима. Проведена типизация особенностей многолетней изменчивости подземных вод для районирования СССР по асинхронности режима методом распознавания образов. Показана эффективность и целесообразность составления на ЭВМ карт трендовых поверхностей для картирования режима подземных вод и его прогнозов, а также как инструмента для анализа региональных закономерностей режима подземных вод в целом и пространственно-временных закономерностей и асинхронности режима подземных вод в частности. Рассмотрены возможные причины, вызывающие асинхронность режима подземных вод.

Исследованы особенности асинхронности режима подземных вод северных и южных районов СССР в связи с решением проблемы переброски части стока рек северного склона на юг и обоснованы оптимальные режимы перебросок во времени (по сезонам года и в многолетнем разрезе), которые приведут к минимальным ущербам использования ресурсов подземных вод в зонах отъема.

Показана возможность составления долгосрочных прогнозов режима подземных вод на основе установленных временных сдвигов режима различных районов.

4. Подтверждены полученные ранее выводы о достоверности существования многолетней цикличности в колебаниях подземного стока. Методами автокорреляционного и спектрального анализов установлено существование достаточно достоверных тенденций к 2–3-, 5–6- и 10–12-летней (реже 7–8-летней) цикличности в подземном стоке. Отмечены неустойчивость этой цикличности во времени (и по длине периодов и по амплитудам), а также невысокий (в среднем около 20%) весовой вклад циклических составляющих в общую дисперсию колебаний, что не обеспечивает в большинстве случаев надежности составления долгосрочных прогнозов режима подземных вод на этой основе. В связи с этим рассмотрены и показаны реальные перспективы составления долгосрочных (до 3–4 лет) прогнозов режима подземных вод путем экстраполяции колебаний как случайного стационарного процесса, определены дальнейшие пути повышения точности таких прогнозов.

5. Впервые исследованы вероятностные закономерности чередования серий маловодных и многоводных лет в подземном стоке различных обеспеченностей, определены для отдельных районов СССР оптимальные (гарантированные восполнением) обеспеченности подземного стока, которые могут быть использованы для оценок естественных ресурсов и эксплуатационных запасов подземных вод, что может увеличить эти ресурсы и запасы иногда в 2–3 раза, а в среднем на 20–30% по сравнению с принятыми на сегодня подходами. Составлены карты распределения оптимальных обеспеченностей подземного стока по территории СССР и максимально возможных продолжительностей маловодных периодов в питании подземных вод при оцененных оптимальных обеспеченностях, определена методика анализа рядов наблюдений для оценки оптимальных расчетных обеспеченностей подземного стока и вероятных, заданной обеспеченности, продолжительностей маловодных периодов, в пределах которых может проектироваться сработка емкостных запасов водоносных горизонтов с гарантией их восполнения

в последующий многоводный период. Данный подход имеет большое практическое значение в районах с дефицитом в воде, где водоотбор соизмерим с восполнением запасов подземных вод и где учет многолетней неравномерности их питания может оказаться существенным резервом увеличения их использования.

6. Рассмотрена и принципиально охарактеризована перспективность наращивания коротких рядов гидрогеологических наблюдений по связям с сезонными накоплениями льда в ледниках. На примере ледника Кой-Авган (Северный Кавказ) показана возможность получения общих многолетних тенденций в изменении увлажненности территории и питания подземных вод на протяжении двух последних столетий, т. е. за период, намного превышающий инструментальные гидрометеорологические наблюдения. Это позволяет создать основу для более достоверного анализа временных гидрогеологических рядов, изучения закономерностей многолетнего режима подземных вод и составления на этой базе прогнозов на будущее, так как практически невозможно заглянуть в будущее природных процессов, не изучив как следует их прошлое.

7. На основе обобщения отечественного и зарубежного опыта рассмотрены перспективы комплексного использования поверхностных и подземных вод с учетом их взаимовлияния и взаимовосполнения, открывающие широкие возможности покрытия дефицита в воде в маловодные периоды за счет рационального регулирования и комбинирования их использования.

Внедрение всех перечисленных методических подходов в практику гидрогеологических работ повысит эффективность использования подземных вод и позволит реально оценить возможности удовлетворения возросших потребностей населения и сельского хозяйства в воде за счет этих вод, что особенно важно в дефицитных водой районах вообще и в районах будущей переброски стока в частности.

Выполненные исследования по рассматриваемой проблеме показали важность изучения условий формирования режима и ресурсов подземных вод как научной основы прогнозов, управления и оптимизации их использования, создания моделей рационального освоения водных ресурсов будущего. Работы в данном направлении, имеющем большое теоретическое и практическое значение, должны продолжаться в следующих аспектах.

1. Изучение глобальных закономерностей и взаимосвязей в формировании влагооборота на Земле в целом и в различных его составляющих: в режиме подземных и поверхностных вод, в режиме накопления влаги в ледниках и почвах, внутренних морях и озерах, переносе влаги и тепла в атмосфере, накоплении воды в океанах. Только на основе такого комплексного анализа глобального водообмена или баланса влаги на Земле в настоящем и прошлом могут быть созданы модели для прогноза процессов водообмена в будущем, на которых могла бы строиться стратегия рационального использования водных ресурсов. В связи с этим от анализа режима подземных вод территории СССР необходимо переходить к обобщению закономерностей режима подземных вод мира, изучению процессов, определяющих асинхронность режима подземных вод в глобальном масштабе, выявлению механизмов, управляющих процессами изменения соотношений различных составляющих баланса влаги на Земле.

2. Разработка научных основ управления ресурсами подземных вод в плане:

а) усовершенствования методов долгосрочного и сверхдолгосрочного прогнозирования режима подземных вод на физических (генетических) основах и как случайного процесса;

б) усовершенствования методов учета неравномерности питания подземных вод не только в многолетнем, но и в сезонном разрезе при планировании рационального использования подземных вод в различных типичных гидрогеологических условиях для территории СССР;

в) разработки комплексного использования подземных и поверхностных вод с учетом их взаимовосполнения и взаимосвязи также в различных конкретных природных условиях.

3. Изучение и прогноз влияния деятельности человека на изменение гидрогеологических условий и окружающую среду и создание моделей, оптимизирующих использование подземных вод с минимальным ущербом среде.

Приложение

Список бассейнов, данные по подземному стоку которых использовались в настоящей работе

Номер створа на карте	Река	Станция (пост)	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>
1	2	3	4
1	Печора	Якша	9619
2	Пижма	Боровая	4890
3	Ваймуга	Пермилово	2810
4	Солза	Сухие Пороги	1190
5	Ена	15,5 км от устья	1600
6	Кола	1429 км Октябрьской ж.д.	3780
7	Луга	Толмачево	5990
8	Плюса	Брод	5090
9	Сороть	Осинкино	3170
10	Утря	Большая Губа	2970
11	Эмайыги	Тарту	7850
12	Пярку	Орекула	5180
13	Гауя	Валмиера	6150
14	Обша	Белый	1590
15	Лучеса	Лускинополь	3280
16	Лиелупе	Межотне	9390
17	Вента	Кулдига	8320
18	Неман	Столбцы	3070
19	Шешупе	Кудиркос-Науместис	3210
20	Миния	Картяна	1230
21	Преголя	Гвардейск	13600
22	Западный Буг	Каменка Бугская	2260
23	Прут	Черновцы	6890
24	Серет	Чортков	31700
25	Южный Буг	Сабаров	9010
26	Ингул	Новогорожено	6670
27	Сож	Ускосы	2600
28	Случь	Данцев	2480
29	Ирша	Украинка	2600
30	Дерекойка	Ялта	49,7
31	Крынка	Новоселовка	582
32	Ворона	Чутановка	5560
33	Подкумок	Лысогорская	1960
34	Кубань	Коста Хетагурова	3800
35	Псекупс	Горячий Ключ	765
36	Шахе	Солох-Аул	423
37	Бзыбь	Джирхва	1410
38	Белая	Каменноостровский	1850
39	Натанеби	Натанеби	469
40	Ксани	Коринта	461
41	Белая Арагви	Млети	107

Приложение (продолжение)

1	2	3	4
42	Гянджачай	Зурнабад	314
43	Дебед	Мегрут	1070
44	Алазани	Чиатура	4530
45	Ахурян	Капс	839
46	Воротан	Ангехакот	787
47	Виравульчай	Осакюджа	11
48	Дзыкнагет	Цовагюх	85
49	Кусарчай	Кузун	250
50	Терек	Орджоникидзе	1490
51	Сунжа	Брагуны	12200
52	Кума	Александровская	15200
53	Волга	Ельцы	9130
54	Ока	Костомарово	4900
55	Протва	Спас-Загорье	3640
56	Свияга	Вырыпаевка	3600
57	Кама	Волосницкое	9750
58	Колва	Петрецова	2830
59	Чусовая	Староуткинск	5450
60	Малый Инзер	Айгир	815
61	Урал	Верхнеуральск	2650
62	Большой Ик	Мраково	1870
63	Раздольная	Тереховка	15500
64	Партизанская	Молчановка	549
65	Никишиха	Атамановка	575
66	Деп	Рычково	8440
67	Большая Бира	Биракан	2910
68	Павловка	Уборка	3350
69	Малиновка	Ракитное	4730
70	Гур	Аксака	5030
71	Лютюга	Чапланово	667
72	Тынь	Адо-Тымовское	3420
73	Хасын	Колымское шоссе 79 км	682
74	Гижига	20 км от устья	11700
75	Тигиль	Тигиль	12000
76	Авача	Елизово	4750
77	Камчатка	Верхнекамчатск	3760
78	Кырвакинот	6,0 км от устья	207
79	Амгуэма	устье р.Шумный	26700
80	Аян-Юрях	Эмтегей	9560
81	Кулу	Кулу	10300
82	Сеймчан	2,1 км выше устья	2920
83	Малый Анюй	Илирней	9220
84	Нера	Ала-Чубук	22300
85	Тутура	Грехова	7100
86	Кута	Ново-Ильинка	11200
87	Витим	Романовка	18200
88	Тобол	Липовское	422000
89	Жуя	Светлый	4790

1	2	3	4
90	Тимптон	Нагорный	613
91	Аллах-Юнь	Аллах	24200
92	Амга	Буяга	23900
93	Конкэмэ	Второй Станок	3550
94	Кемпендяй	Кемпендяй	1290
95	Эбитизэм	Эбетем	1000
96	Ус	Усть-Золотая	6110
97	Абакан	Абаза	14400
98	Туба	Бугуртак	31400
99	Кизир	Имисское	9080
100	Олха	Олха	590
101	Белая	Мальта	17600
102	Ия	Тулун	14500
103	Уда	Алыгджер	4980
104	Баргузин	Баргузин	19800
105	Чикой	Гремячка	15600
106	Хилок	Малета	25700
107	Большая Речка	Посольская	565
108	Хара-Мурин	Мурино	1130
109	Большой Пит	Брянка	15100
110	Сым	Сым	22800
111	Елогуй	Келлог	16300
112	Нижняя Тунгуска	Подволошино	8270
113	Турухан	Янов Стан	10100
114	Песчаная	Точильное	4720
115	Чарыш	Чарышское	20700
116	Иня (Нижняя)	Кайлы	15700
117	Уса	Междуреченск	3320
118	Кия	Мариинск	9820
119	Тым	Напас	24500
120	Большой Юган	Угут	22100
121	Ульба	Ульба-Перевалочная	4900
122	Тара	Муромцево	16400
123	Ишим	Целиноград	7400
124	Уй	Степное	3600
125	Тура	Туринск	29000
126	Пышма	Богандинское	18600
127	Сосьва	Сосьва	22100
128	Лобва	Лобва	2940
129	Каргат	Гавриловский	3910
130	Кулунда	Шимолино	12300
131	Гунт	Хорог	13700
132	Лянгар	устье	335
133	Кафирниган	Чинар	3040
134	Варзоб	Дарган-Ата	1270
135	Сурхандарья	клх. им. Жданова	5450
136	Зеравшан	Дупули	10200
137	Ягнобдарья	Такфон	1490
138	Мургаб	Тахта-Базар	34700

Приложение (продолжение)

1	2	3	4
139	Чу	Чапаево (Таш-Уткуль)	26700
140	Талас	Караой	2450
141	Тюп	Сартологой	513
142	Карадарья	Кампыррават	12400
143	Нарын	Нарын	10500
144	Чирчик	Ходжикент	10900
145	Арысь	Арысь	13100
146	Гавасай	Гава	657
147	Сох	Сары-Канда	2480
148	Исфайрамсай	Учкурган	2200
149	Жаксы-Сарысу	Сарысу	570
150	Аягуз	Аягуз	8180
151	Каратал	Уштобе	13200
152	Шарын	Сарытогай	7370
153	Талгар	Талгар	444
154	Сугой	3,2 км ниже устья	5880
155	Мегра	Павловское	660
156	Ветлуга	Ветлуга	22200
157	Сейм	Мутино	25600
158	Медведица	Аргидинская	33700
159	Эмба	Араштобе	2600
160	Мезень	Малонисогорская	56400
161	Илск	Гилик	37300
162	Уса	Адзьва	54700
163	Вычегда	Федякино	112000
164	Пур	Самбург	95100
165	Оленек	Оленек	89200
166	Яна	Верхоянск	45300
167	Адыча	Урдюк-Кумах	89600
168	Индигирка	Воронцово	305000
169	Колыма	Среднеколымск	361000
170	Анадырь	Новый Ерепол	47300
171	Пенжина	Каменское	71600
172	Сырдарья	Тюмень-Арык	21900
173	Моинты	Киик	836
174	Такрау	Ак-Тогай	2740
175	Баканас	Чубартау	3020
176	Чу	Фурманово	27100
177	Или	Ушжармо	12900
178	Курты-Узун	Агач	8920
179	Тентек	Тункуруз	330
180	Нура	Романовское	40600
181	Тургай	пески Тусум	50900
182	Жиланды	в 1,9 км выше устья	2160
183	Кара-Тургай	Акутколь	14400
184	Сырдарья	Казалинск	21900
185	Кашка-Дарья	Куратикол	7530
186	Амударья	Карамыш-Таш	227000
187	Кургат-Сай	Джиргитал	935

Приложение (продолжение)

1	2	3	4
188	Эмба	Дюсеке	38800
189	Сагиз	Сагиз	9680
190	Актасты	Белгородский	45
191	Уил	Алты-Карасу	7030
192	Сакмара	Верхнее Галеево	3550
193	Салмыш	Буланово	2710
194	Самара	Ново-Сергеевка	1340
195	Урал	Калмыково	229000
196	Черная	Красный Холм	988
197	Чагра	Новотулка	2550
198	Таловая	Юлдашбаево	1550
199	Боровка	Паника	2040
200	Большой Иргиз	Пугачев	18200
201	Большой Узень	Русская Таловка	7480
202	Еруслан	Песчанка	4200
203	Кубань	Дегтяревский	1200
204	Терек	Котляровская	9320
205	Терек	Каргалинская	36800
206	Мокрая Буйвола	Благородное	2160
207	Калаус	Петровское	4760
208	Дон	Раздорская	378000
209	Сал	Моисеев	209
210	Большой Егорлык	Ново-Егорлык	14800
211	Хопер	Дундуковский	60600
212	Черная Калитва	Ольховатка	1250
213	Молочная	Молочанск	2780
214	Кальчик	Мацаков	469
215	Ингул	Ингульская	3080
216	Учан-Су	Ялта	37
217	Бижок-Карасу	Калиновка	1140
218	Стырь	Луцк	
219	Ингулец	Могиловка	
220	Сула	Лубны	
221	Десна	Брянск	
222	Березина	Бобруйск	
223	Кемь	Подужемье	
224	Сясь	Яхново	
225	Унжа	Макарьев	
226	Вятка	Киров	
227	Клязьма	Владимир	
228	Пинга	Кулогоры	
229	Б. Черемшан	Мелекесс	
230	Чир	Обливская	
231	Пур	Самбург	
232	Тавда	Тавда	
233	Исеть	Мехонское	
234	Онь	Калачинск	
235	Васюган	Васюган	
236	Кеть	Максимкин Яр	

## Приложение (окончание)

1	2	3	4
237	Томь	Томск	
238	Алей	Хабазино	
239	Вилюй	Сунтар	
240	Лена	Грузновка	
241	Илим	Сотниково	
242	Бирюса	Сполох	
243	Иркут	Смоленщина	
244	Киренга	Шорохово	
245	Шилка	Сретенск	
246	Зея	Зейские ворота	
247	Буряя	Каменка	
248	Алдан	Томмот	
249	Иман	Картун	
250	Уссури	Кировская	
251	Уфа	Караидель	

## ЛИТЕРАТУРА

- Балашов Л.С.* Роль артезианских вод в питании крупных рек на примере р.Амударьи. — В кн.: Тр. III Всесоюз. гидрол. съезда. Л.: Гидрометеиздат, 1959, т. 9, с. 146—153.
- Бендат Дж., Пирсол А.* Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1971. 407 с.
- Биндеман Н.Н.* Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. Л.: Госгеоиздат, 1963. 204 с.
- Биндеман Н.Н., Ковалевский В.С., Язвин Л.С.* Основные научные и практические аспекты проблемы рационального использования подземных вод. — Вод. ресурсы, 1977, № 6, с. 48—58.
- Боचेвер Ф.М., Гармонов И.В., Лебедев А.В.* и др. Основы гидрогеологических расчетов. М.: Недра, 1969. 367 с.
- Боचेвер Ф.М., Просенков В.И., Язвин Л.С.* Подземные воды Москвы и Подмоскovie. — Гор. хоз-во, 1966, № 10, с. 26—28.
- Будыко М.И.* Современное изменение климата. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 47 с.
- Будыко М.И., Винников К.Я.* Современные изменения климата. — Метеорология и гидрология, 1973, № 9, с. 3—13.
- Будыко М.И., Винников К.Я., Дроздов О.А.* и др. Предстоящие изменения климата. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1978, № 6, с. 5—20.
- Великина Г.М., Зекцер И.С.* О многолетней изменчивости подземного стока. — Вод. ресурсы, 1975, № 2, с. 108—121.
- Великина Г.М., Огильви Н.А., Красс М.С.* Модели гидрогеологических условий территории на основе аппроксимации физических и геологических полей полиномами. — Вод. ресурсы, 1976, № 1, с. 3—26.
- Веригин Н.Н.* Об оценке стока рек. — В кн.: Вопросы проектирования водонапорных сооружений. М.: ВОДГЕО, 1963, с. 177—196.
- Воропаев Г.В.* Проблема водообеспечения страны и территориальное перераспределение водных ресурсов. — Вод. ресурсы, 1982, № 6, с. 3—28.
- Воскресенский К.П.* Норма и изменчивость годового стока рек Советского Союза. М.: Гидрометеиздат, 1962. 546 с.
- Гаврюхина А.А.* Воды каменноугольных отложений Москвы и их современное состояние. — Тр. Лаб. гидрогеол. пробл. им. Ф.П.Саваренского АН СССР, 1959, т. 24. 95 с.
- Гидрогеологическая карта СССР, м-б 1 : 2 500 млн. М.: ГУГК, 1964
- Гидрогеология СССР. Сводный том. Ресурсы подземных вод и перспективы их использования. М.: Недра, 1977. Вып. 3. 385 с.
- Дементьев Н.Ф.* Синхронность в колебаниях уровней подземных вод. — Метеорология и гидрология, 1963, № 2, с. 10—17.
- Дементьев Н.Ф.* К анализу связанности многолетних рядов годового стока. — Метеорология и гидрология, 1969, № 2, с. 54—61.
- Доброумов Б.М.* Анализ внутривековых и вековых колебаний подземного стока в реки. Исследование подземного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1969, с. 29—52.
- Епихов Г.П.* Об единой математической модели речного бассейна. — Вод. ресурсы, 1978, № 5, с. 69—78.
- Ермолина Н.А., Клиге Р.К.* Использование водных ресурсов зарубежной Европы. — Вод. ресурсы, 1979, № 4, с. 162—175.
- Зальцберг Э.А., Деч В.Н., Кноринг Л.Д.* Долгосрочные прогнозы уровней подземных вод. — Разведка и охрана недр, 1970, № 10, с. 43—46.
- Зекцер И.С.* Роль артезианских вод в питании крупных рек на примере среднего и нижнего течения р.Неман. Метео-

рология и гидрология, 1963, № 2, с. 42–46.

*Зекцер И.С.* Закономерности формирования подземного стока и научно-методические основы его изучения. М.: Наука, 1977. 173 с.

*Злотник В.А.* Методы расчета береговых водозаборов подземных вод с оценкой их влияния на водный режим водоемов и водотоков: Автореф. дис. ... канд. наук. М., 1979. 20 с.

*Иванов А.Т.* Определение подземной составляющей речного стока гидрохимическим способом. – Тр. Лаб. гидрогеол. пробл. им. Ф.П.Саваренского АН СССР, 1948, т. 3, с. 243–246.

*Калинин Г.П.* Проблемы глобальной гидрологии. М.: Гидрометеоздат, 1968. 377 с.

*Качукова Т.Н.* Колебания годового стока рек СССР. – Тр. ГГИ, 1955, вып. 50/104, с. 56–117.

*Клиге Р.К.* Современные изменения некоторых компонентов глобального водообмена. – Вод. ресурсы, 1979, № 2, с. 21–31.

*Ковалевский В.С.* Условия формирования и прогнозы естественного режима подземных вод. М.: Недра, 1973. 153 с.

*Ковалевский В.С.* Основы прогнозов естественного режима подземных вод. М.: Стройиздат, 1974. 207 с.

*Ковалевский В.С.* Многолетние колебания уровней подземных вод и подземного стока. М.: Наука, 1976. 270 с.

*Ковалевский В.С.* Исследование режима подземных вод при их разведке и эксплуатации. – В кн.: Тр. МАГ "Методы оценки ресурсов подземных вод": Симпоз. в Вильнюсе. М.: Наука, 1979, с. 225–228.

*Ковалевский В.С., Семькина Г.И.* Учет продолжительности серий маловодных и многоводных лет в питании подземных вод при планировании рационального использования их ресурсов. – В кн.: Оценка и рациональное использование ресурсов подземных вод. М.: Наука, 1980, с. 5–15.

*Ковалевский В.С., Челидзе Ю.Б.* Особенности картирования естественного режима подземных вод. – Вод. ресурсы, 1974, № 4, с. 115–121.

*Коноплянцев А.А.* Вековые и многолетние колебания уровня грунтовых вод на территории СССР. – В кн.: Вопросы изучения и прогноза режима подземных вод. М.: ВСЕГИНГЕО, 1970, вып. 25, с. 34–59.

*Коноплянцев А.А., Ковалевский В.С.,*

*Семенов С.М.* Естественный режим подземных вод и его закономерности. М.: Гостеолтехиздат, 1963. 231 с.

*Коноплянцев А.А., Семенов С.М.* Прогноз и картирование режима грунтовых вод. М.: Недра, 1974. 214 с.

*Коноплянцев А.А., Семенов С.М.* Изучение, прогноз и картирование режима подземных вод. М.: Недра, 1979. 193 с.

*Кошулько А.И.* Гидрогеологические исследования для обоснования искусственного пополнения напорного водоносного комплекса (на примере Северного Крыма): Автореф. дис. ... канд. наук. М.: 1981. 23 с.

*Крицкий С.Н., Менкель М.Ф.* Гидрологические основы речной гидротехники. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1950. 392 с.

*Куделин Б.И.* Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. М.: Изд-во МГУ, 1960. 344 с.

*Кузин П.С.* Циклические колебания стока рек северного полушария. Л.: Гидрометеоздат, 1970. 179 с.

*Кумсаишвили Г.П., Семенова С.М., Леви Л.З.* Возможности использования подземных вод для покрытия дефицитов водопотребления в засушливых районах: Экспресс-информ. ЦБНТИ Мин. водхоза СССР, 1978, вып. 10, сер. 4, 15 с.

*Макаренко Ф.А.* О подземном питании рек. – Тр. Лаб. гидрогеол. пробл. им. Ф.П.Саваренского, 1948, т. 1, с. 64–71.

*Максимов И.В.* Геофизические силы и воды океана. Л.: Гидрометеоздат, 1971. 447 с.

*Миалер Р.Л., Кан Дж.С.* Статистический анализ в геологических науках. М.: Мир, 1965. 482 с.

*Надь Г.* Распознавание образов. – В кн.: Обзорные труды Инт-та инженеров по электротехнике и радиоэлектронике, 1968, т. 56, № 5, с. 45–65.

*Озильви Н.А., Плетнев А.А.* О математической модели режима грунтовых вод. – В кн.: Применение математических методов при гидрогеол. и инженерно-геологических исследованиях. М.: ВСЕГИНГЕО, 1968, вып. 6, с. 45–52.

*Ожунь Я.* Факторный анализ. М.: Статистика, 1974. 199 с.

*Плетнев А.А.* Нахождение весовых функций линейной системы по запасам входных и выходных величин (случай различной "памяти" по каждому из

входов). — В кн.: Применение математических методов при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях. М.: ВСЕГИНГЕО, 1970, вып. 34, с. 14—19.

*Плотников Н.И.* Поиски и разведка пресных подземных вод для полей крупного водоснабжения. М.: Изд-во МГУ, 1965. Ч. 1. Гидрогеологические основы. 243 с.

*Поляков В.А., Селецкий Ю.Б.* Исследование элементов динамики подземных вод ассельско-клязьминского водоносного горизонта по радиоуглероду и тритию. — Геохимия, 1978, № 8, с. 1230—1238.

*Попов О.В.* Нарушение взаимосвязи поверхностных и подземных вод под влиянием урбанизации. — В кн.: Гидрогеологические аспекты урбанизации. М.: Моск. фил. Геогр. о-ва СССР, 1978, с. 36—41.

*Просенков В.И.* Влияние градопромышленного комплекса Москвы на процессы формирования подземных вод. — В кн.: Гидрогеологические аспекты урбанизации. М.: Моск. фил. Геогр. о-ва СССР, 1978, с. 42—50.

*Раткович Д.Я.* Многолетние колебания речного стока. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 255 с.

*Романов В.В., Ферронский В.И., Вакуловский С.М.* и др. Содержание трития в поверхностных водах СССР, 1979—1980 гг. — Вод. ресурсы, 1981, № 6, с. 46—52.

*Рубинштейн Е.С., Полозова Л.Г.* Современное изменение климата. Л.: Гидрометеоздат, 1966. 268 с.

*Сачок Г.И.* Пространственно-временная структура гидрометеорологического режима Белоруссии и прилегающих регионов. Минск: Наука и техника, 1980. 221 с.

*Сидоркина С.П.* О долгосрочном прогнозе гидрогеологических процессов методами теории стационарных случайных функций. — В кн.: Применение математических методов при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях. М.: ВСЕГИНГЕО, 1970, вып. 104, с. 74—92.

*Скляренко В.Л., Смирнов Н.П.* О применении многомерного анализа в гидрологии. — Тр. Ин-та биологии внутр. вод АН СССР, 1974, т. 26/29, с. 180—205.

*Сомов Н.В.* Асинхронность и цикличность колебаний стока крупных рек СССР. — Тр. ЦИП, 1963а, вып. 117, с. 180—214.

*Сомов Н.В.* Асинхронность колебаний стока крупных рек СССР. — Метеорология и гидрология, 1963б, № 5, с. 14—21.

*Субботин А.И.* Сток талых и дождевых вод. Л.: Гидрометеоздат, 1966. 376 с.

*Сычев К.И.* О режиме естественного восполнения грунтовых вод в речных долинах аридной зоны. — В кн.: Геология четвертичного периода, инженерная геология, гидрогеология аридной зоны. М.: Наука, 1976, с. 360—363.

*Токарев Н.С.* Разделение территории СССР по характеру режима климата, подземных и поверхностных вод. — Тр. Новочерк. политехн. ин-та, 1962, с. 3—25.

*Финкельштейн Д.Н.* Инертные газы. М.: Наука, 1979. 200 с.

*Чижевский А.Л.* Земное эхо солнечных бурь. М.: Мысль, 1973. 367 с.

*Шнитников А.В.* Внутривековая изменчивость компонентов общей увлажненности. Л.: Наука, 1969. 244 с.

*Эйгенсон М.С.* Солнце, погода и климат. Л.: Гидрометеоздат, 1963. 274 с.

*Якуцени В.П.* Геология гелия. Л.: Недра, 1968. 232 с.

*Яницкий И.Н.* Гелиевая съемка. М.: ВИЭМС, 1979. 96 с.

*Andrews J.N., Lee D.J.* Inert gases in ground water from the Bunter sandstone of England as indicators age and palaeoclimatic trends. — J. Hydrol. 1979, vol. 41, N 3/4, p. 233—252.

*Aulenbach D.B.* Use of tracers to confirm ground-water flow. — Ground Water, 1978, vol. 16, N 3, p. 561—565.

*Birtles A.B.* Siting of ground-water abstractions for river regulation. — Memoires of IAH, Birmingham congr. 1977, vol. XIII, p. 1, Papers, p. D32—D41.

*Birtles A.B., Wilkinson W.B.* Mathematical simulation of ground-water abstraction from confined aquifers for river regulation. — Water Resour. Res., 1975, vol. 11, N 15, p. 571—580.

*Custodio E., Cacho F., Suares M.* et al. Combined use of surface and ground water in the Barcelona Metropolitan area (Spain). — Memoires IAH, Birmingham congr. 1977, vol. XIII, p. 1, Papers, p. C14—C27.

*Downing R.A., Oakes D.B., Wilkinson W.B., Wright C.E.* Regional development of ground-water resources in combination with surface water. — J. Hydrol., 1974, vol. 33, N 22, p. 155—157.

*Downing R.A., Smith D.B.* The age of

ground water in the limestone England. — J. Hydrol., 1977, vol. 33, N 3/4, p. 201–216.

*Downing R.A., Pearson F.J., Smith D.B.* The flow mechanism in the chalk based on ratio-isotope analysis of ground water in the London Basin. — J. Hydrol., 1979, vol. 40, N 1/2, p. 67–84.

*Freeze R.N.* Role of subsurface flow in generating surface runoff. — Water Resour Res., 1972, vol. 8, N 3, p. 609–623.

*Fritz P., Pearson F.J., Barker J.* The carbon isotope geochemistry of a small ground-water system. — Water Resour Res., 1978, vol. 14, N 6, p. 1059–1067.

*Glover R.E., Bainer G.G.* River depletion resulting from a well pumping near a river. — Trans. Amer. Geophys. Union, 1954, N 35, p. 468–470.

*Gottshalk L., Nordberg L.* Ground-water level response. — Memoires of IAH, Vilnius Congr., 1979, vol. 15, p. 1, Papers, p. 241–245.

*Harmon R.S.* The chemical and isotopic composition of carbonate groundwater: Nature of bedrock dissolution in karst terrains. — In: Karst Hydrogeology. Alabama, 1977, p. 519–533.

*Herzberg O., Mazor E.* Hydrological applications of noble gases and temperature measurements in underground water systems. — J. Hydrol. 1979, vol. 41, N 3/4, p. 217–232.

*Johnston R.H., Leaky P.P.* Combined use of digital aquifer models and field base-flow data to identify recharge leakage areas of artesian aquifers. — J. Res. US Geol. Surv. 1977, vol. 5, N 4, p. 491–496.

*Kemp J.B., Wright C.E.* The assessment of river regulation losses. — Memoires IAH, Birmingham Congr. 1977, vol. XIII, p. 1, Papers, p. D1–D19.

*Kullman E.* L'évaluation des ressources des eaux souterraines accumulées de la structure karstique et leur utilisation pour l'augmentation saisonnière du débit de la source karstique. — Memoires IAH, Vilnius Congr. 1979, vol. 15, p. 1, Papers, p. 245–248.

*Owen M., Connorton D.I., Robinson V.K.* The hydrogeology of the Thames ground water scheme. — Memoires IAH, Birmingham Congr., 1977, vol. XIII, p. 1, Papers, p. D20–D31.

*Payne B.R., Ortiz J.S.* Determination of the mechanism of recharge in the Lonnanios area in Mexico using environmental isotope technique. — Water Resour Res., 1979, vol. 15, N 1, p. 171–175.

*Pitman J.* Carbonate chemistry of groundwater from tropical tower karst. — Water Resour Res., 1978, vol. 14, N 5, p. 270–275.

*Thompson G.M., Hayes J.M.* Trichlorofluoromethane in ground water — a possible tracer and indicator of groundwater age. — Water Resour Res., 1979, vol. 15, N 3, p. 211–215.

*Wardlaw R., Fleming G.* An integrating surface/sub-surface hydrological response model. — Memoires IAH, Birmingham Congr., 1977, vol. XIII, p. 1, Papers, p. E48–E56.

*Wright C.E.* Combined use of surface and groundwater in the Ely Ouse and Nar catchments. — In: Water Resources Board, Reading, 1974, 43 p.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
<b>Глава 1</b>	
Характеристика исходных материалов, использованных для анализа и обобщений .....	9
Состав исходных данных и оценка их приемлемости .....	9
Методика получения информации о сезонной изменчивости подземного стока .....	17
Принципы оценки степени нарушенности режима подземных вод .....	26
<b>Глава 2</b>	
Изучение и учет многолетней направленности в режиме подземных вод при оценках их ресурсов и гидрогеологических прогнозах .....	29
Состояние проблемы .....	29
Определение вероятностно-статистической значимости трендов .....	30
Особенности территориальной приуроченности различных типов многолетних трендов .....	36
Региональная и глобальная изменчивость ресурсов подземных вод и генетические причины, ее обуславливающие .....	40
Возможности долгосрочных прогнозов режима и ресурсов подземных вод на основе экстраполяции вскрытых трендов .....	51
<b>Глава 3</b>	
Анализ реальности существования многолетней цикличности в колебаниях уровней подземных вод и подземного стока и оценка перспектив гидрогеологического прогнозирования на этой основе .....	56
Постановка задачи и методика исследований .....	56
Внутрирядная взаимосвязанность и цикличность в рядах гидрогеологических наблюдений .....	60
Оценка вклада циклической составляющей в общую дисперсию процесса .....	64
Исследование региональной приуроченности различной цикличности в режиме подземных вод .....	67
Перспективы гидрогеологических прогнозов с учетом вероятной многолетней цикличности питания подземных вод .....	68
<b>Глава 4</b>	
Исследование синхронности и асинхронности режима уровней подземных вод и подземного стока .....	78
Состояние проблемы .....	78

Разномасштабность процесса асинхронности . . . . .	83
Особенности районирования и картирования режима подземных вод на основе факторного анализа . . . . .	110
Районирование СССР по синхронности и асинхронности многолетнего режима подземных вод . . . . .	115
Синхронность и асинхронность внутригодового режима подземных вод северных и южных районов страны в связи с решением проблем территориального перераспределения стока . . . . .	118
Сибирский вариант переброски стока . . . . .	122
Европейский вариант переброски стока . . . . .	123
<b>Глава 5</b>	
Учет закономерностей чередования серий маловодных и многоводных лет в питании подземных вод при планировании рационального их использования . . . . .	126
Постановка задачи и пути ее решения . . . . .	126
Понятие оптимальной обеспеченности питания подземных вод . . . . .	129
Оценка оптимальной обеспеченности по эмпирическим данным . . . . .	135
Распределение оптимальных обеспеченностей восполнения ресурсов подземных вод по территории СССР . . . . .	141
Оценка оптимальных обеспеченностей по теоретическим расчетам . . . . .	145
<b>Глава 6</b>	
Применение гелиевой съемки для решения некоторых задач оптимизации использования ресурсов подземных вод . . . . .	155
<b>Глава 7</b>	
Оценка перспектив реставрации данных режима подземных вод и вероятностные оценки возможных изменений ресурсов подземных вод . . . . .	171
Состояние проблемы . . . . .	171
Перспективы наращивания гидрогеологических рядов по палеогляциологическим данным . . . . .	172
Вероятностные оценки возможной многолетней изменчивости ресурсов подземных вод . . . . .	178
<b>Глава 8</b>	
Некоторые вопросы рационального и комплексного использования ресурсов поверхностных и подземных вод . . . . .	183
Выводы и заключение . . . . .	190
Приложение . . . . .	194
Литература . . . . .	200

Владимир Серафимович Ковалевский

**МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ РЕСУРСОВ  
ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

*Утверждено к печати*

*Институтом водных проблем АН СССР*

Редактор *Л.Н. Фальковская*

Редактор издательства *Э.Б. Травицкая*

Художник *А.А. Кущенко*

Художественный редактор *М.В. Версоцкая*

Технический редактор *Н.М. Петракова*

Корректор *Е.Н. Сафронникова*

ИБ № 27146

Подписано к печати 24.05.83. Т — 09345  
Формат 60x90 1/16. Бумага офсетная № 1  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 13,0+0,8 вкл.  
Усл.кр.-отт. 13,9. Уч.-изд.л. 16,3  
Тираж 1100 экз. Тип.зак. 322  
Цена 2 р. 50 к.

Издательство "Наука", 117864 ГСП-7,  
Москва В-485, Профсоюзная ул., д. 90  
Ордена Трудового Красного Знамени  
1-я типография издательства "Наука",  
199034, Ленинград В-34, 9-я линия, 12

## ИЗДАТЕЛЬСТВО "НАУКА"

### ГОТОВЯТСЯ К ПЕЧАТИ КНИГИ:

Сарманов О.В., Сарманов И.О. **Основные типы корреляции, применяемые в гидрологии.** 13 л. 2 р.

В монографии излагается теория корреляции — теория двумерных распределений, которые нашли или найдут приложение при описании и построении математических моделей гидрологических процессов, а также для моделирования случайных величин, встречающихся в гидрологии. Некоторые типы корреляции могут быть использованы и уже используются в теории прогнозирования, а также при водохозяйственных расчетах.

Для научных работников и практиков, ведущих работы в области гидрологии, гидротехники и водного хозяйства.

Великанов А.Л., Коробова Д.Н., Пойзнер В.И. **Моделирование процессов функционирования водохозяйственных систем.** 9 л. 1 р. 40 к.

В монографии рассмотрено современное состояние проблемы управления водохозяйственными системами (ВХС) в условиях комплексного использования водных ресурсов. Обосновывается применение метода численной имитации на ЭВМ для решения указанной проблемы. Приводятся основные положения теории имитационного моделирования и формируются методологические особенности ее водохозяйственных приложений. Предлагается методика проведения имитационных экспериментов для построения правил управления ВХС и анализа их эффективности.

Для специалистов в области водного хозяйства.

Заказы просим направлять по одному из перечисленных адресов магазинов "Книга-почтой" "Академкнига"

480091 Алма-Ата, 91, ул. Фурманова, 91/97; 370005 Баку, 5, ул. Джапаридзе, 13; 320093 Днепропетровск, проспект Ю. Гагарина, 24; 734001 Душанбе, проспект Ленина, 95; 252030 Киев, ул. Пирогова, 4; 277012 Кишинев, проспект Ленина, 148; 443002 Куйбышев, проспект Ленина, 2; 197345 Ленинград, Петрозаводская ул., 7; 220012 Минск, Ленинский проспект, 72; 117192 Москва, В-192, Мичуринский проспект, 12; 630090 Новосибирск, Академгородок, Морской проспект, 22; 620151 Свердловск, ул. Мамина-Сибиряка, 137; 700187 Ташкент, ул. Дружбы народов, 6; 450059 Уфа, 59, ул. Р. Зорге, 10; 720001 Фрунзе, бульвар Дзержинского, 42; 310078 Харьков, ул. Чернышевского, 87.

2 р. 50 к.

3943

